

BIOHIILEN LISÄYKSEN VAIKUTUKSET
KOMPOSTOINTIPROSESSIIN LAITOSMITTAKAAVAN
TUNNELIKOMPOSTOINNISSA

PEKKA MÄKINEN

HELSINGIN YLIOPISTO
YMPÄRISTÖTIETEIDEN LAITOS
YMPÄRISTÖEKOLOGIA
PRO GRADU -TUTKIELMA
01.04.2016



Tiedekunta – Fakultet – Faculty Bio- ja ympäristötieteellinen tiedekunta		Laitos – Institution– Department Ympäristötieteiden laitos	
Tekijä – Författare – Author Pekka Mäkinen			
Työn nimi – Arbetets titel – Title Biohiilen lisäyksen vaikutukset kompostointiprosessiin laitosmittakaavan tunnelikompostoinnissa			
Oppiaine – Läroämne – Subject Ympäristöekologia			
Työn laji – Arbetets art – Level Pro gradu -tutkielma		Aika – Datum – Month and year Huhtikuu 2016	Sivumäärä – Sidoantal – Number of pages 59
Tiivistelmä – Referat – Abstract <p>Pohjoismaissa syntypaikkalajitellun biojätteen kompostointi suurissa kompostointilaitoksissa on yleistynyt merkittävästi 2000-luvun aikana. Viime vuosina biojätteiden ja muiden orgaanisten jätteiden käsittelyssä on alettu suosimaan yhä enemmän mädätysprosessia sekä mädätyksen ja kompostoinnin yhdistävää osavirtamädätysprosessia. Mädätysprosessin avulla orgaanisten jätteiden sisältämästä energiasta pystytään tuottamaan biokaasua ja siitä edelleen uusiutuvaa energiaa.</p> <p>Tämän tutkimuksen lähtökohtana oli tarkastella biohiilen lisäyksen vaikutuksia kompostointiprosessiin, jossa yhdistyvät mädätys ja kompostointi. Aiempien tutkimusten perusteella biohiilen lisäyksellä on todettu olevan positiivisia vaikutuksia erilaisten orgaanisten jätteiden kompostointiprosessiin. Aiemmat tutkimukset on suurimmaksi osaksi tehty pienemmässä mittakaavassa ja ne ovat keskittyneet enemmän maatalousjätteiden kompostointiin. Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää voidaanko verrattain pienellä biohiilen lisäyksellä nopeuttaa orgaanisen aineksen hajoamista sekä parantaa typen pidättymistä kompostimassassa erilliskerätyn biojätteen osavirtamädätysprosessin kompostointivaiheessa. Tutkimuksen kokeellinen osuus koostui laboratoriomittakaavan kompostointikokeesta sekä laitosmittakaavan kompostointikokeesta Ämmäsuon jätteenkäsittelykeskuksessa. Laboratoriomittakaavan kokeiden tarkoituksena oli saada tietoa eri biohiilipitoisuuksien vaikutuksesta kompostointiprosessiin ja toistomäärien kautta saada tuloksille tieteellistä pätevyyttä. Laboratoriokokeissa saatuja tuloksia sovellettiin laitosmittakaavan kokeissa. Tuloksia pyritään tarkastelemaan mikrobiologisen prosessin lisäksi osana jätehuoltoa ja sen kehittämistä.</p> <p>Tulosten perusteella biohiilen lisäyksellä oli myönteinen vaikutus kompostointiprosessiin osavirtamädätysprosessin kompostointivaiheessa. Laboratoriokokeissa biohiilen lisäyksellä oli merkitsevä vaikutus orgaanisen aineksen hajoamiseen ja siten kompostimassan mikrobiaktiivisuuteen. Vaikka laitosmittakaavan kokeessa biohiilen lisäys ei vaikuttanut orgaanisen aineksen hajoamiseen tilastollisesti merkitsevästi, voidaan kokonaisuutena arvioida, että biohiili lisäsi kompostien mikrobiaktiivisuutta. Biohiilellä havaittiin merkitsevä vaikutus kompostien stabiloitumisnopeuteen ja ammoniumtypen pidättymiseen kokeen lopputilanteessa. Verrattain pienet biohiilipitoisuudet eivät vaikuttaneet haihtuneen ammoniakkin määrään eivätkä kokonaistyyppihäviöön kompostoinnin alkuvaiheessa.</p> <p>Biohiilikompostien stabiloitumisnopeudella ja mikrobiaktiivisuuden lisääntymisellä on kompostoinnin ympäristövaikutusten vähentämisen lisäksi kompostointilaitoksille myös taloudellinen merkitys, koska niiden avulla pystytään mahdollisesti säästämään tuotantokustannuksissa sekä säästämään kompostien jälkikypsytykseen tarvittavaa tilaa tai vastaavasti lisäämään kompostointilaitosten kapasiteettia. Tulevaisuudessa biohiili on teoriassa mahdollista saada osaksi orgaanisten jätteiden käsittelykokonaisuutta. Jäteperäisten biohiiltien käytöllä voi tulevaisuudessa olla mahdollista parantaa resurssien kestäväää käyttöä ja alueellisia kierrätysmääriä.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords Biohiili, biojäte, kompostointi, osavirtamädätys, pyrolyysi, tunnelikompostointi			
Ohjaaja tai ohjaajat –Handledare – Supervisor or supervisors Martin Romantschuk, Aino Kainulainen ja Kari Steffen			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information			

1	Johdanto	2
1.1	Toimeksiannon tausta.....	3
1.2	Tutkimuksen tavoite	4
1.3	HSY:n toiminta-alue	5
1.4	Tutkimuksen teoreettinen viitekehys ja aiemmat tutkimukset.....	7
1.4.1	Kompostointi.....	7
1.4.2	Biohiili.....	10
1.4.3	Biohiilen vaikutukset kompostointiprosessiin	11
1.4.4	Kompostimassan kemialliset ominaisuudet ja mikrobiaktiivisuus ...	12
1.4.5	Orgaanisen aineksen hajoaminen	13
1.4.6	Kaasumaiset typpiyhdisteet.....	13
2	Aineisto ja menetelmät.....	15
2.1	Laboratoriomittakaavan kompostointikoe	16
2.1.1	Koeasetelma	16
2.1.2	Mittaukset ja analyysit	18
2.2	Laitosmittakaavan kompostointikoe	20
2.2.1	Näytteenotto	22
2.2.2	Laboratorioanalyysit ja mittaukset	23
2.3	Aineiston käsittely ja tilastolliset analyysit.....	24
3	Tulokset.....	25
3.1	Laboratoriomittakaavan kokeen tulokset	25
3.2	Laitosmittakaavan kokeen tulokset	29
4	Tulosten tarkastelu	38
4.1	Biohiilen vaikutus kompostimassan ominaisuuksiin ja aktiivisuuteen .	38
4.1.1	Hiilidioksidin tuotto	39
4.1.2	pH.....	40
4.1.3	Kuiva-aine	40
4.2	Biohiilen vaikutus typpiyhdisteisiin.....	41
4.2.1	Kokonaistyyppi	41
4.2.2	Ammoniakki.....	41
4.2.3	Ammoniumtyppi	44
4.3	Epävarmuustekijät.....	45
4.4	Biohiilen käyttö osaksi orgaanisten jätteiden käsittelyä	46
4.4.1	Pyrolyysi suoran energiahyödyntämisen rinnalle	48
4.4.2	Tulevaisuus Ämmäsuolla	50
4.4.3	Lainsäädäntö ja tutkimustiedon vaillinaisuus	52
5	Johtopäätökset	53
6	Kiitokset	54
7	Kirjallisuus	55

1 Johdanto

Tämä Pro gradu -tutkielma on tehty Helsingin seudun ympäristöpalveluiden (HSY) toimeksiannosta. Helsingin seudun ympäristöpalvelut on kuntayhtymä, joka tuottaa Helsingin, Espoon, Vantaan ja Kauniaisten alueelle vesihuollon ja jätehuollon palveluja sekä tietoa pääkaupunkiseudusta ja sen ympäristöstä. HSY palvelee toiminta-alueellaan yli miljoonaa ihmistä. Espoossa Ämmäsuolla sijaitsee Pohjoismaiden suurin toiminnassa oleva jätteenkäsittelykeskus, jonka toiminnasta HSY vastaa. Ämmäsuolla käsitellään koko toiminta-alueen erilliskerätty biojäte.

Yhdistyneiden kansakuntien elintarvike- ja maatalousjärjestön mukaan vuosittain noin kolmannes ihmisravinnoksi tuotetusta ruuasta päättyy jätteeksi ruuan koko toimitusketjun aikana. Tämä tarkoittaa yhteensä 1,3 miljardia tonnia ruokajätettä. (Gustavsson ym. 2011). Ruokajäte sisältää paljon energiaa ja sen oikeanlaisella käsittelyllä ja hyödyntämisellä pystytään vähentämään ympäristön kuormitusta sekä tuottamaan uusiutuvaa energiaa. Lisäksi nopea kaupungistuminen on lisännyt jätteiden määrää kaupungeissa ja siten edelleen lisännyt tehokkaampien ja ympäristöä vähemmän kuormittavien jätteenkäsittelymenetelmien kehittämistarvetta maailmanlaajuisesti.

Vaikka Euroopan Unionin jätedirektiivin (2008/98/EY) jätehierarkiassa jätteiden synnyn ehkäisy on ensimmäisenä, pystytään alempien hierarkiatasojen jätteiden uudelleenkäytön sekä kierrättämisen tehostamisella ja kehittämisellä merkittävästi vähentämään syntyneiden jätteiden käsittelyn ympäristövaikutuksia. Kompostoinnin on esitetty olevan ympäristöystävällinen sekä kestävä menetelmä käsitellä ja kierrättää biohajoavaa jätettä (Pagans ym. 2006). Esimerkiksi Pohjoismaissa syntypaikkalajitellun biojätteen kompostointi suurissa kompostointilaitoksissa on lisääntynyt merkittävästi 2000-luvun aikana (Sundberg ym. 2011). Viime vuosina on kuitenkin alettu suosimaan yhä enemmän mädätyksen ja kompostoinnin yhdistäviä jätteenkäsittelymenetelmiä. Mädätyks- ja

kompostointiprosessin yhdistävän menetelmän avulla biojätteestä pystytään kompostin lisäksi tuottamaan biokaasua ja siitä edelleen uusiutuvaa energiaa. Näin pystytään lisäämään biojätteen sisältämän energian hyötykäyttöä. (Franke-Whittle ym. 2014). Yleisesti jätteiden hävittämisen ja energian nousevat kustannukset sekä ympäristötietoisuuden lisääntyminen ovat kasvattaneet ruokajätteiden energiakäytön taloudellista houkuttelevuutta ja lisänneet ruokajätteiden käsittelyn ympäristövaikutuksien huomioon ottamista (Pham ym. 2015).

1.1 Toimeksiannon tausta

Tämän tutkielman toimeksiannon taustalla on HSY:n KOMBI-kehittämiprojekti, jonka tarkoituksena on kehittää uutta biojätteen käsittelyn osavirtamädätysprosessia, vähentää biojätteen käsittelyssä syntyviä jätevesiä sekä tehostaa prosessin typen talteenottoa. Projekti saa rahoitusta ympäristöministeriön ravinteiden kierrätystä edistävästä ohjelmasta.

KOMBI-kehittämiprojektiin liittyen Ämmäsuolla suoritettiin tammi- ja helmikuussa 2015 kompostointikoe, jossa tutkittiin biohiilen lisäyksen vaikutuksia kompostointiprosessin ravinnevirtoihin sekä hajujen muodostumiseen. Kokeen vähäinen toistomäärä ja koeolosuhteiden vaihtelu aiheuttivat sen, että saatuja tuloksia ei voitu pitää tieteellisesti pätevinä. Kokeessa saadut tulokset kuitenkin tukivat sitä oletusta, että biohiilen avulla pystytään lisäämään ravinteiden pidättymistä kompostimassassa sekä vähentämään kompostointiprosessissa syntyviä hajuhaittoja (Kainulainen ja Mäkinen 2015). Ensimmäisen kompostointikokeen tuloksia hyödynnettiin tämän tutkimuksen suunnittelussa ja toteutuksessa. Tämän tutkimuksen yhtenä tärkeänä tavoitteena olikin saada tuotettua tieteellisesti päteviä tuloksia biohiilen lisäyksen vaikutuksesta kompostointiprosessiin sekä minimoida aikaisemmassa kokeessa ilmenneet epävarmuustekijät.

Kevättalvella 2015 tehdyn kompostointikokeen jälkeen Ämmäsuolla on otettu käyttöön mädätyksen ja kompostoinnin yhdistävä biojätteen osavirtamädätysprosessi. Prosessissa mädätetään saapuvan biojätteen hienojae, joka on noin 70 prosenttia saapuvasta biojätteestä. Mädätyksen avulla biojätteen sisältämä energia pystytään muokkaamaan biokaasuksi ja siitä edelleen lämmöksi ja sähköksi. Mädätysjäännös kompostoidaan biojätteen ja tukiaineen kanssa. Mädätysprosessin käyttöönotto on vaikuttanut merkittävästi kompostoitavan massan kemiallisiin ominaisuuksiin. Käyttöönoton jälkeen kompostoitavan massan pH on selkeästi kasvanut sekä ammoniumtypen määrää on lisääntynyt, minkä seurauksena kompostoinnin alkuvaiheessa syntyvän haihtuneen ammoniakkin määrän voidaan olettaa lisääntyneen. (Kainulainen ja Mäkinen 2015)

1.2 Tutkimuksen tavoite

Biohiilen lisäyksen positiivisista vaikutuksista kompostointiprosessin tehokkuuteen ja ravinteiden pidättymiseen kompostimassassa on olemassa tieteellistä tietoa (Steiner ym. 2010), mutta tutkimusten selkeä painopiste on ollut maatalousjätteiden kompostoinnissa ja suurin osa tutkimuksista on suoritettu laboratorio- tai pilot-mittakaavassa. Tämän takia ei voida olettaa, että aiempaa tutkimustietoa voitaisiin soveltaa sellaisenaan biojätteen osavirtamädätysprosessiin laitosmittakaavassa. Tietääkseni ainoa kirjallisuuslähde biohiilen lisäyksen vaikutuksista biojätteen orgaanisen aineksen hajoamiseen ja typpihävikkiin laitosmittakaavan kompostoinnissa on Vandecastelen ym. (2016) tekemä tutkimus, jossa 10 % (kuivapainosta) biohiilen lisäyksellä oli positiivinen vaikutus orgaanisen aineksen hajoamiseen sekä typpihävikkiin. Mädätys- ja kompostointiprosessit yhdistävien jätteenkäsittelymenetelmien yleistyessä on tärkeä saada tutkimustietoa biohiilen lisäyksen vaikutuksista myös laitosmittakaavan osavirtamädätysprosessin kompostointivaiheessa.

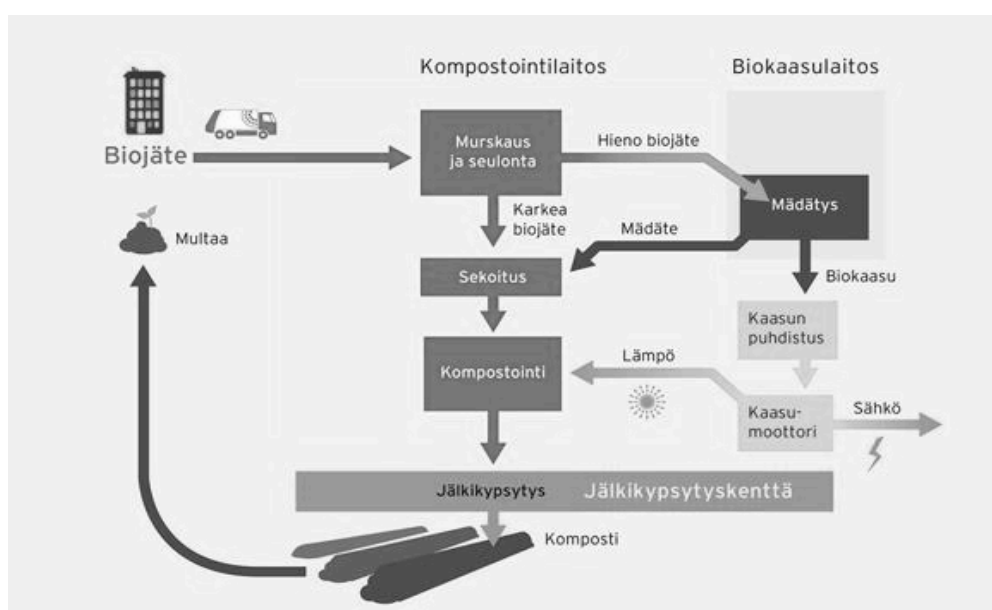
Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, voidaanko laitosmittakaavassa verrattain pienellä biohiilen lisäyksellä nopeuttaa orgaanisen aineksen hajoamista erilliskerätyn biojätteen osavirtamädätysprosessin kompostointivaiheessa sekä parantaa typen pidättymistä kompostimassassa. Pienten biohiilimäärien tarkoituksena oli kartoittaa sellaisia pitoisuuksia, joiden käyttö olisi kokonaisuutena järkevää laitosmittakaavan kompostoinnissa ja siten mahdollista ottaa käyttöön tulevaisuudessa. Tämän takia en pyri tarkastelemaan biohiilen vaikutuksia kompostointiin pelkästään mikrobiologisen prosessin, vaan myös liittämään sen osaksi jätehuoltoa ja sen kehittämistä.

Tutkimuksen kokeellinen osuus koostui laboratoriomittakaavan kompostointikokeesta sekä laitosmittakaavan kompostointikokeesta. Laboratoriomittakaavan kompostointikokeen tarkoituksena oli aluksi tarkastella pienten (2 % - 6 % märkäpainosta) biohiilipitoisuuksien vaikutusta kompostointiprosessiin. Laboratoriokokeista saatuja tuloksia sovellettiin edelleen laitosmittakaavan kompostointikokeisiin Ämmäsuon jätteenkäsittelykeskuksessa. Laboratoriomittakaavan kokeen yhtenä tarkoituksena oli toistomäärien kautta saada tuloksille tieteellistä pätevyyttä vähentämällä sattuman mahdollisuutta tuloksissa. Laitosmittakaavan tutkimuksissa toistoja ei taloudellisista syistä pystytty tekemään ja tämän seurauksena sattuman mahdollisuus voi helposti johtaa tulosten väärin tulkintoihin.

1.3 HSY:n toiminta-alue

HSY:n toiminta-alueella asuu yli miljoona ihmistä, joten käsiteltävän biojätteen määrä on Suomen mittakaavassa erittäin suuri. Pääosa pääkaupunkiseudun biojätteestä syntyy asuinkiinteistöissä ja palvelutoimialoilla. HSY:n teettämien tutkimusten mukaan erilliskerättyä biojätettä syntyy asukasta kohden vuodessa keskimäärin 34 kiloa. Ämmäsuolla käsitellään vuosittain noin 51000 tonnia biojätettä. (Toukola ym. 2011). Pääkaupunkiseudulla kotitalouksien sekajätteestä

noin 40 % on biojätettä, eli 69 kiloa asukasta kohden vuodessa (Pulkinen ja Sinisalo 2012). Tämä tarkoittaa sitä, että yhteensä biojätteen määrä sekajätteessä on suurempi kuin erilliskerätyn biojätteen määrä. Vastaanotettavan kompostointikelpoisen jätteen määrä tulee tulevaisuudessa kasvamaan, kun vuonna 2020 Espoon Blominmäkeen valmistuu uusi jätevedenpuhdistamo. Sen puhdistamolietteen käsittely tulee kokonaisuudessaan tapahtumaan Ämmäsuolla. Biojätteenkäsittelyprosessi on esitetty tarkemmin kuvassa 1. Kompostoinnissa käytetään tunnelikompostointimenetelmää.



Kuva 1. Kaavakuva Ämmäsuon jätteenkäsittelykeskuksen biojätteenkäsittelyprosessista (HSY 2015).

Vuoden 2016 alussa Suomessa tuli voimaan Valtioneuvoston asetus (179/2012) biohajoavan ja muun orgaanisen yhdyskuntajätteen kaatopaikkakiellosta. Kaatopaikkakiellon tarkoituksena on pyrkiä vähentämään jätteiden käsittelystä syntyviä kasvihuonekaasupäästöjä ja kaatopaikkojen vesistökuormitusta sekä lisäämään jätevirtojen hyödyntämistä materiaalina ja energiana. Asetuksen tavoitteena on ollut kannustaa alan toimijoita kehittämään kierrätettäviä materiaaleja sekä tehokkaampia jätteenkäsittelymenetelmiä (Wahlström ym. 2012). Materiaali- ja energiatehokkuuden parantamisessa sekä materiaalivirtojen hyödyntämisessä HSY:llä on toiminta-alueellaan merkittävä rooli. Suurta

pääkaupunkiseudun toimijaa voidaan pitää myös eräänlaisena suunnannäyttäjänä ja siten kansallisesti merkittävänä toimijana tehokkaampien jätteenkäsittelymenetelmien kehittämisessä ja käyttöönotossa.

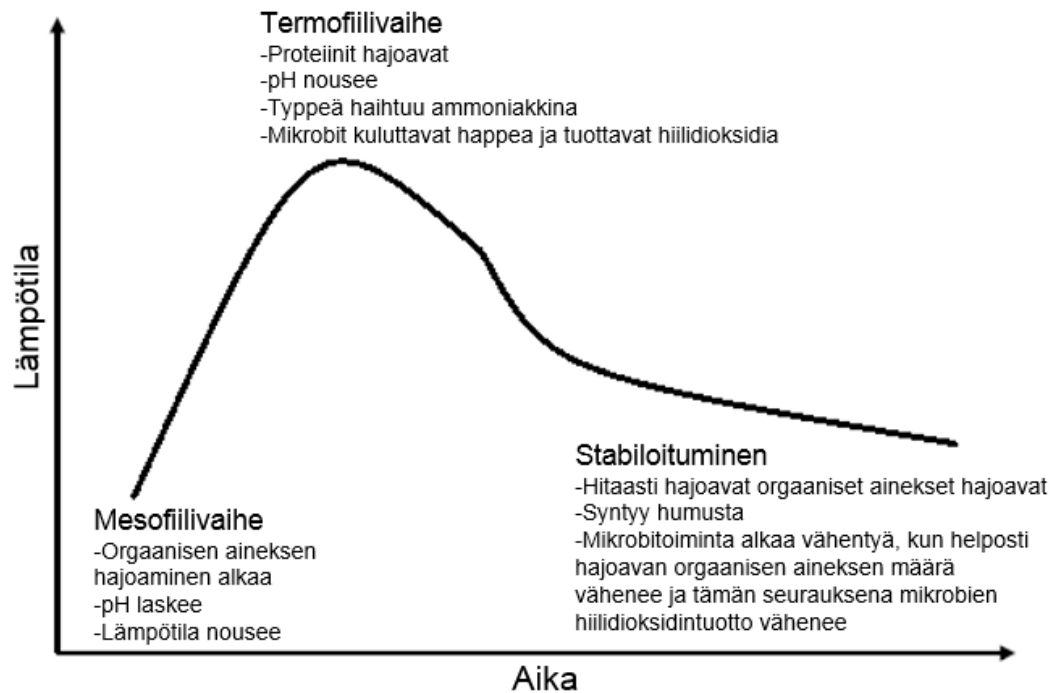
1.4 Tutkimuksen teoreettinen viitekehys ja aiemmat tutkimukset

1.4.1 Kompostointi

Kompostoinnilla tarkoitetaan mikrobitoiminnan seurauksena aerobisissa oloissa tapahtuvaa biologisesti hajoavan orgaanisen aineksen hajotusta takaisin epäorgaanisiksi yhdisteiksi ja humukseksi. Kompostoinnissa orgaanisen aineksen hajoaminen perustuu siihen, että mikrobit hyödyntävät orgaanista ainesta energianlähteenään ja sitä kautta mikrobilajistossa tapahtuviin nopeisiin muutoksiin (Itävaara ym. 2006; Dias ym. 2010). Mikrobilajistossa tapahtuvat muutokset vaikuttavat lajien väliseen kilpailuun (Dias ym. 2010), mikä edelleen vaikuttaa kompostin olosuhteisiin ja kypsymiseen. Kompostoinnin alkuvaiheessa orgaanisen aineen hajoaminen on nopeaa, koska mikrobeille helposti saatavilla olevia ravinteita on paljon. Mikrobien metaboliassa vapautuu lämpöä, jonka seurauksena kompostimassan lämpötila nousee. (Itävaara ym. 2006). Mikrobien toimintaan ja mikrobilajiston muutoksiin vaikuttavat muun muassa typen määrä, käytettävissä oleva hiilen määrä sekä kompostimassan happipitoisuus (Sánchez-García ym. 2015).

Kompostointiprosessin tarkoituksena on vähentää kaatopaikalle sijoitettavan orgaanisen jätteen määrää sekä samalla parantaa ravinteiden ja humusaineiden kierrätystä. Kompostimassan lämpötila pyritään nostamaan ja pitämään niin korkealla, että haitalliset bakteerit ja kasvien siemenet kuolevat (Sundberg ym. 2011). Kompostointiprosessi voidaan jakaa kolmeen eri vaiheeseen. Mikrobitoiminnan seurauksena kaikkiin vaiheisiin liittyy erilaisia kemiallisia ja

fysikaalisia reaktioita, joista tärkeimmät on esitetty kuvassa 2. (Itävaara ym. 2006). Kompostointiprosessissa syntyvää multaa voidaan käyttää maanrakennusaineena sekä lannoitteena.

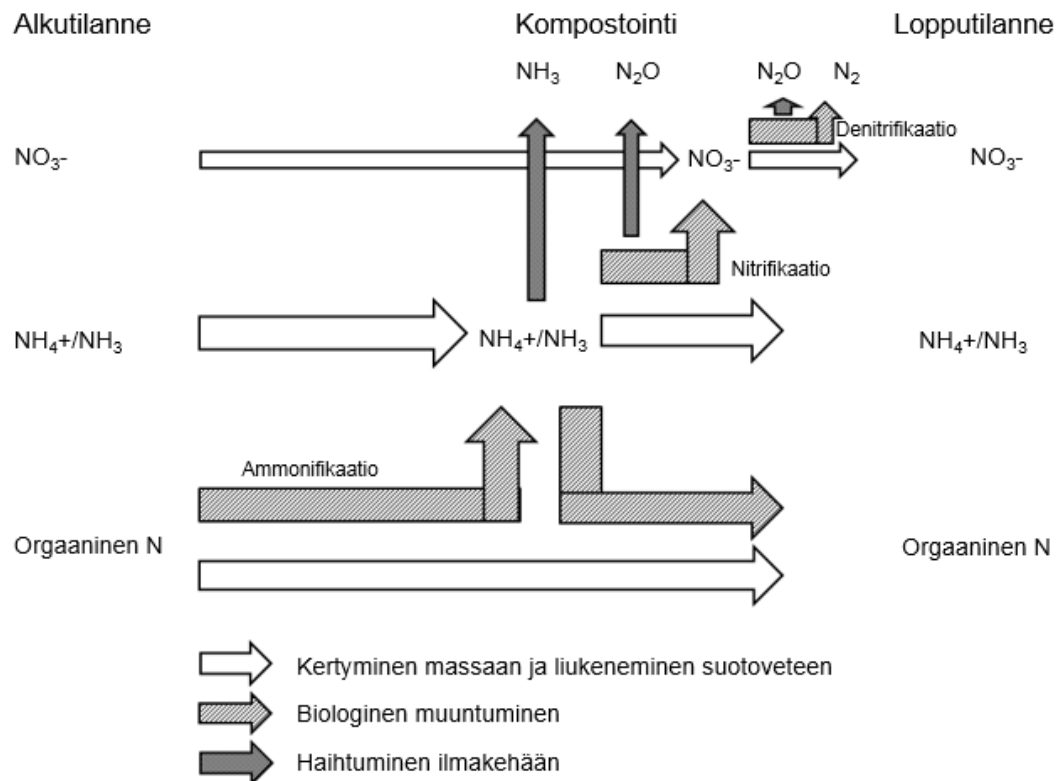


Kuva 2. Kompostointiprosessin eri vaiheet (muokattu; Itävaara ym. 2006).

Kompostointiprosessi on monimuotoinen kokonaisuus, johon vaikuttavat kompostimassan fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet sekä kompostin olosuhteet. Olosuhteisiin vaikuttaa kompostimassaan sekoitettava tukiaine, jonka tarkoituksena on parantaa kompostimassan fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia sekä mahdollistaa mikrobeille riittävä hapen saanti ja siten pitää kompostointiprosessi aerobisena. Hajoavan orgaanisen aineksen lisääminen kompostimassaan vaikuttaa kompostin hiili/typpi -suhteeseen ja edelleen mikrobilajiston muutoksiin. (Dias ym. 2010). Tukiaineiden ja lisäaineiden lisääminen kompostimassaan on hyvin yksinkertainen ja helppo tapa vaikuttaa kompostoinnin ympäristövaikutuksiin ja ravinnemääriin (Sánchez-García ym. 2015).

Erilaisten prosessiparametrien, esimerkiksi lämpötilan (Pagans ym. 2006), ilmastuksen (de Guardia ym. 2008) ja pH:n (Sundberg ym. 2004) vaikutuksia kompostointiprosessiin sekä erilaisten lisä- ja tukiaineiden käyttöä kompostoinnissa on tutkittu melko laajasti. Viime vuosina tutkimuksen kohteena olleita tukiaineita ovat olleet esimerkiksi puutuhka (Kuba ym. 2008; Kurola ym. 2011; Fernández-Delgado Juárez ym. 2015) ja biohiili (Dias ym. 2010; Malińska ym. 2014; Sánchez-García ym. 2015). Tutkimusten perusteella biohiilellä ja puutuhkalla on havaittu positiivia vaikutuksia kompostointiprosessiin, vaikka tutkimusten lähestymistavat ja tukiainelisäysten vaikutukset ovat olleet hieman erilaisia. Biohiilen ja puutuhkan käyttö kompostoinnissa ei ole kuitenkaan täysin ongelmatonta, koska poltettavan tai pyrolysoitavan massan raskasmetallit konsentroituvat molempiin tuotteisiin (Kurola ym. 2011; Tiilikkala ym. 2013).

Mädätysprosessin yhdistäminen kompostointiin vaikuttaa erityisesti kompostimassan ammoniumtypen määrään, koska mädätysprosessissa orgaanisten tyyppiyhdisteiden ja proteiinien hajotuksessa muodostuu ammoniumtypeä. Ammoniumtypen määrä taas vaikuttaa edelleen haihtuneen ammoniakkin määrään. Mädätysprosessin seurauksena myös kompostimassan pH nousee. Pääkaupunkiseudulla tehdyn erilliskerätyn biojätteen koostumustutkimuksen mukaan biojätteen kokoomanäytteiden pH-arvot olivat 5,0 - 5,8 (Toukola ym. 2011). Yleisesti neutraali tai hieman emäksinen pH on myönteinen asia kompostoinnin kannalta, koska alhaiset pH-arvot hidastavat kompostointiprosessin käynnistymistä sen alkuvaiheessa (Sundberg ym. 2011). Toisaalta korkea pH-arvo yhdessä korkean lämpötilan kanssa lisää ammoniakkin haihtumista, koska ammoniakkin ja ammoniumin tasapainoreaktio alkaa siirtyä enemmän ammoniakkin suuntaan (Pagans ym. 2006). Osavirtamädätysprosessin kompostoinnin alkuvaiheessa tätä voidaan pitää ongelmallisena, koska ammoniumina olevan typen määrä on merkittävä ja pH-arvot ovat korkeita. Tyyppiyhdisteiden muutokset kompostointiprosessin aikana on esitetty tarkemmin kuvassa 3.



Kuva 3. Typen kierto kompostoinnin aikana (muokattu; de Guardia ym. 2010).

Typen oksidit ja ammoniakki ovat voimakkaita kasvihuonekaasuja ja lisäksi ammoniakin pistävä haju aiheuttaa hajuhaittoja kompostointilaitosten läheisyydessä. Ammoniakin haihtuminen on ongelma erityisesti typpipitoisten jätteiden kompostoinnissa. (Pagans ym. 2006). Typen kiertoa tarkasteltaessa pyritään tunnistamaan ne keinot, joilla haihtuneiden typpiyhdisteiden määrää pystytään vähentämään kompostoinnin aikana. Typpihävikki vähentää kompostituotteiden arvoa lannoitteena. Valmiiden kompostituotteiden kannalta paras vaihtoehto on pyrkiä pidättämään typpiyhdisteet kompostimassassa (de Guardia ym. 2010).

1.4.2 Biohiili

Biohiili on hiilituote, jota voidaan valmistaa erilaisista biomassoista pyrolyysin eli kuivatuslausmenetelmän avulla. Pyrolyysillä tarkoitetaan orgaanisten aineiden

kuumentamista hapettomissa olosuhteissa. Biohiilen valmistamiseen voidaan käyttää esimerkiksi puuta tai maatalousjätettä. Pyrolyysissä biomassaa kuumennetaan hapettomissa oloissa hitaasti noin 500 °C:een, jolloin sen energiatiheys kasvaa. (Lehmann 2007a). Samanlaista menetelmää käytetään esimerkiksi grillihiilien valmistuksessa. Biohiilen lisäksi pyrolyysissä syntyy kaasua, lämpöä sekä tisleitä, joita voidaan hyödyntää uusiutuvana energiana (Lehmann 2007b). Biomassojen pyrolyysissä muodostuva uusiutuva energia ja siinä syntyvät sivutuotteet ovat herättäneet tiedemaailman lisäksi myös poliittista kiinnostusta, koska sivutuotteena syntyvän hitaasti hajoavan biohiilen avulla pystytään sitomaan ilmakehän hiilidioksidia hiilinieluiksi maaperään (Clough ja Condrón 2010).

Biohiili vaikuttaa maaperän ominaisuuksiin monin eri tavoin. Biohiilituotteiden käytön on arvioitu hyödyttävän maataloutta, ympäristöä sekä ilmastoa. Kirjallisuuden perusteella biohiileen lisääminen maaperään on parantanut veden ja ravinteiden pidättymistä ja sitä kautta kasvattanut satomääriä. Biohiilen on myös arvioitu edistävän orgaanisten jätteiden kierrättämistä sekä pilaantuneen maaperän kunnostamista. (Abiven ym. 2014). Maaperässä hitaasti hajoava biohiili toimii hiilinieluna, koska ilmakehän hiilidioksidi yhteyttämisessä pelkistyy sokereiksi ja edelleen kasvibiomassaksi, josta biohiili valmistetaan (Lehmann 2007b). Biohiilen myönteisistä vaikutuksista maaperään on olemassa paljon tieteellistä tietoa, mutta sen vaikutuksia kompostointiprosessiin on tutkittu huomattavasti vähemmän (Jindo ym. 2012b).

1.4.3 Biohiilen vaikutukset kompostointiprosessiin

Kompostointiin liittyvän biohiilitutkimuksen painopiste on ollut selkeästi maatalousjätteiden, eikä niinkään biojätteen kompostoinnissa. Kirjallisuuden perusteella biohiilen lisääminen kompostimassaan esimerkiksi vähentää kompostoinnissa syntyviä ammoniakkipäästöjä (Steiner ym. 2010; Malińska ym.

2014), muuttaa mikrobiyhteisön rakennetta ja sitä kautta biojättemassan kemiallisia ominaisuuksia (Jindo ym. 2012a), vähentää kompostoinnissa syntyviä hajuhaittoja (Dias ym. 2010; Fagernäs ym. 2014) ja kiihdyttää orgaanisen aineksen hajotusta (Steiner ym. 2010; Sánchez-García ym. 2015).

1.4.4 Kompostimassan kemialliset ominaisuudet ja mikrobiaktiivisuus

Kompostoinnin alkuvaiheessa kompostimassan kemiallisiin ja biokemiallisiin ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa jo hyvin pienillä biohiilipitoisuuksilla. Jindo ym. (2012b) käyttivät tutkimuksessaan omenoiden puristusjätteen ja siipikarjan jätteiden sekoituksen kompostointiin 2 % (tilavuudesta) biohiilen lisäystä. Biohiilen lisäys vaikutti kompostoinnin kannalta myönteisesti kompostimassan kemiallisiin ominaisuuksiin. (Jindo ym. 2012b.) Biohiilen lisääminen kompostiin lisää myös merkittävästi hiilen määrää, mutta pysyvyytensä takia se ei lisää mikrobeille käytettävässä muodossa olevan hiilen määrää (Steiner ym. 2010).

Jindon ym. (2012a) tutkimuksen mukaan biohiilen lisääminen kompostimassaan sekä kompostoitavan jätteen alkuperä vaikuttivat mikrobiyhteisön rakenteeseen kompostointiprosessin aikana. Nämä muutokset mikrobiyhteisössä vaikuttivat kompostin fysikaalisiin ja kemiallisiin ominaisuuksiin ja edelleen kompostimassasta valmistettavien lopputuotteiden ominaisuuksiin (Jindo ym. 2012a). Wang ym. (2013) havaitsivat tutkimuksessaan, että biohiilen sekoittaminen sianlantakompostiin nosti kompostimassan pH-arvoja sekä kasvatti kuiva-ainepitoisuutta. Nämä muutokset kompostimassassa vaikuttivat edelleen denitrifikaatioprosessiin osallistuviin mikrobiyhteisöihin ja siten vähensivät kompostoinnissa haihtuneen dityppioksidin määrää. Biohiilen lisäyksellä kompostimassaan on havaittu olevan vaikutuksia myös bakteeriheimojen ja -sukujen monimuotoisuuteen (Wei ym. 2014) sekä joidenkin sieniyhteisöjen esiintymiseen (Jindo ym. 2012b). Yhtenä ongelmana kuitenkin voidaan pitää sitä, että biohiilten fysikaalisten ja kemiallisten ominaisuuksien vaikutuksista

maaperän mikrobilajistoon ja edelleen maaperän prosesseihin ei ole olemassa kattavaa kokonaiskuvaa (Lehmann ym. 2011).

1.4.5 Orgaanisen aineksen hajoaminen

Steinerin ym. (2010) tutkimuksen mukaan karjan lantaa kompostoitaessa biohiilen lisääminen kompostimassaan nopeutti kompostointia. Malińskan ym. (2014) mukaan biohiilen lisääminen jätevesilietteen ja puuhakkeen kompostiseokseen nosti kompostin lämpötilaa ja lisäsi orgaanisen aineksen hajoamista pilotmittakaavan kompostointikokeessa. Biohiilen lisäyksen avulla on pystytty nopeuttamaan orgaanisen aineksen hajoamista myös sianlannan ja olkien sekoituksen sekä bio- ja viherjätteen sekoituksen kompostoinnissa (Vandecasteele ym. 2011; Vandecasteele ym. 2016; Zhang ym. 2016). Jo alle viiden prosentin biohiilen lisäyksellä voidaan kiihdyttää orgaanisen aineksen hajoamista kompostoinnissa (Malińska ym. 2014; Sánchez-García 2015).

1.4.6 Kaasumaiset typpiyhdisteet

Kompostoinnissa typpihävikkiä tapahtuu erityisesti kaasumaisina typpiyhdisteinä, tällaisia ovat esimerkiksi ammoniakki, dityppioksidi ja typpikaasu. Useimmissa kompostointitutkimuksissa ammoniakkipäästöt ovatkin aiheuttaneet merkittäviä typpihävikkejä. Kompostoitavien materiaalien korkea typpipitoisuus sekä alhainen hiili/typpi -suhde lisäävät ammoniakin haihtumista kompostimassasta, mikä puolestaan lisää kompostoinnin kokonaistyppihävikkiä (Steiner ym. 2010). Biohiilen on havaittu sitovan dityppioksidia kompostimassaan (Fagernäs ym. 2014). Kaasumaisten yhdisteiden hävikkiä vähentämällä pystytään parantamaan jalostetun lopputuotteen ominaisuuksia sekä vähentämään ihmisiin ja ympäristöön kohdistuvaa kuormitusta (Sánchez-García ym. 2015).

Orgaanisten jätteiden kompostoinnista aiheutuva ammoniakin haihtuminen aiheuttaa pistäviä hajuja sekä lisää ympäristön kuormitusta. Kompostoinnissa ammoniakin haihtumiseen vaikuttaa erityisesti kompostoitavan massan pH, lämpötila sekä ammoniumtypen määrä. (Pagans ym. 2006). Biohiilen kyky vähentää haihtuneen ammoniakin määrää kompostoinnissa perustuu lähinnä sen kykyyn absorboida esimerkiksi ammoniumtyppeä sekä urea- ja virtsahappoja (Malińska ym. 2014). Malińska ym. (2014) lisäsivät laboratoriomittakaavan tutkimuksessa 4 % (märkäpaino) biohiiltä jätevesilietteen ja puuhakkeen sekoitukseen. Biohiilen lisääminen vähensi kompostoinnissa syntyneitä ammoniakkipäästöjä merkittävästi kompostoinnin ensimmäisen viikon aikana. Kuitenkin kokeiden toisella viikolla biohiilikomposteissa ammoniakkipäästöt olivat hieman korkeammat. Tutkimuksessa käytetty biohiilen määrä on yksi alhaisimmista kirjallisuussarvoista. (Malińska ym. 2014.)

Vandecasteele ym. (2011) tutkivat biohiilen vaikutuksia kompostointiprosessiin laitosmittakaavan kompostointikokeessa. Tutkimuksessa käytettiin viherjätettä sekä kotitalousbiojätettä. Sekoitettuun biojättemassaan lisättiin biohiiltä suhteessa 9:1 (biojäte:biohiili, kuivapaino). Kyseinen biohiilen määrä vähensi kompostoinnin ammoniakkipäästöjä. Steiner ym. (2010) käyttivät biohiiltä siipikarjan jätösten kompostoinnissa. Biohiiltä lisättiin 20 % (kuivapainosta) ja sillä saatiin jopa yli 50 % vähennyksiä ammoniakkipäästöihin (Steiner ym. 2010). Kirjallisuuden perusteella voidaan todeta, että suurimmilla biohiilimäärillä on saatu aikaiseksi myös merkittävimmät ammoniakkipäästövähennykset (Malińska ym. 2014). Laitosmittakaavan kompostoinnissa näin suuret biohiililisäykset eivät kuitenkaan ole taloudellisesti järkeviä.

Toisaalta on myös tutkimustuloksia, joiden perusteella pienten biohiilimäärien lisääminen kompostimassaan ei vähennä kaasumaisia typpipäästöjä (Sánchez-García ym. 2015). Sánchez-García ym. (2015) sekoittivat 3 % (kuivapainosta) biohiiltä siipikarjan lannan ja ohran korsien sekaan. Tutkimuksen tulosten

perusteella biohiili ei vaikuttanut kokonaistyyppihävikkiin eikä kaasumaisten tyyppiyhdisteiden määrään kompostoinnin aikana.

2 Aineisto ja menetelmät

Tutkimuksen kokeellinen osuus koostui kahdesta kompostointikokeesta. Aluksi suoritettiin laboratoriomittakaavan kompostointikoe, jonka tuloksia hyödynnettiin laitosmittakaavan kompostointikokeessa Ämmäsuon jätteenkäsittelykeskuksessa. Ämmäsuolla tunnelikomposteissa kompostoidaan raakabiojätteestä, mädätteestä ja tukiaineesta koostuvaa kompostimassaa. Ämmäsuolla on käytössä kaksi mädätysreaktoria, joissa saapuvan biojätteen hienojae mädätetään. Kokeiden aikana mädätyslaitos oli vielä sisäänajovaiheessa ja silloin toisessa reaktorissa mädätysprosessi oli termofiilinen ja sen lämpötila oli 51 - 52 °C ja toisessa reaktorissa mädätysprosessi oli mesofiilinen ja sen lämpötila on 41 °C. Molemmissa kokeissa käytetty mädäte otettiin mesofiilisestä mädätysprosessista.

Ämmäsuolla yhteen kompostointitunneliin täytetään noin 270 tonnia kompostimassaa, josta tukiainetta on noin 160 tonnia. Kompostoinnissa käytettävä tukiaineseos koostuu puuhakkeesta (17 %), risuhakkeesta (23 %), kompostiylitteestä (18 %) sekä kenttäylitteestä (42 %). Massaprosenttiosuudet ovat suuntaa antavia ja ne on laskettu yhden viikon aikana valmistetusta tukiaineseoksesta. Ylitteillä tarkoitetaan seulonnassa eroteltua karkeaa materiaalia. Kompostiylitteellä tarkoitetaan tunnelikompostointivaiheen jälkeisessä seulonnassa syntyvää ylitettä ja kenttäylitteellä tarkoitetaan ulkoauomojen seulonnassa eroteltavaa halkaisijaltaan yli 14 mm kompostoitumatonta materiaalia.

Molemmissa kokeissa käytettiin Biolan Oy:n valmistamaa hiiltä. Biolan Oy:n hiilen valmistusprosessi perustuu kaksoisretorttisysteemiin. Hiilen valmistuksessa lämpötila retorttisysteemin ulkopinnalla on 600 °C, mutta retortin sisällä lämpötila

on noin 450 °C. Hiilto kestää yhteensä 12 tuntia, josta itse palamiseen kuluu 3 tuntia. Biolan Oy:n valmistaman hiilen raaka-aineena käytetään lehtipuuta. (Fontell H, henkilökohtainen sähköpostiviesti 19.8.2015). Laboratoriokokeissa käytetty biohiili oli murskattua grillihiiltä, kun taas laitosmittakaavan kokeisiin hiili toimitettiin valmiina lastuina. Molempien hiilien valmistusprosessi oli kuitenkin samanlainen. Kokeissa käytettyjen biohiilien raekoko vaihteli hiilipölystä 1 - 3 cm kokoisiin lastuihin.

2.1 Laboratoriomittakaavan kompostointikoe

2.1.1 Koeasetelma

Laboratoriomittakaavan kompostointikokeessa pyrittiin jäljittelemään mahdollisimman hyvin Ämmäsuon tunnelikompostien kompostointiprosessia. Näytteenotto tapahtui Ämmäsuon jätteenkäsittelykeskuksessa. Kompostimassan sekoittimen jälkeiseltä liukuhihnalta otettiin osanäytteitä lapiolla 60 litran saaviin yhteensä noin 40 litraa. Näytteenotto kesti yhteensä noin 10 minuuttia. Laitosmittakaavan kompostoinnin kompostimassan raekoko oli liian suuri laboratoriomittakaavan kokeisiin, joten näyte murskattiin Senfit Sample Mill 2013 SM-120 näytemurskaimella.

Kirjallisuuden perusteella kokeissa käytetyiksi biohiilipitoisuuksiksi valittiin 2 % (BH2), 3 % (BH3), 4 % (BH4) ja 6 % (BH6) kompostimassan märkäpainosta (Malińska ym. 2014; Sánchez-García ym. 2015). Biohiilikompostien lisäksi kokeessa oli mukana kontrollikomposteja, joihin ei lisätty biohiiltä. Biohiilenä käytettiin Biolan Oy:n valmistamaa murskattua grillihiiltä. Hiili murskattiin ämpäriässä huhmareen survimen avulla. Kompostimassa ja valitut biohiilimäärät sekoitettiin ämpäreissä, joista kompostimassa siirrettiin edelleen 1,5 litran Rottegrad-astioihin (Kuva 4). Astiat täytettiin siten, että kompostimassan yläreuna

oli noin 3 - 5 cm astian yläreunasta. Kaikille käsittelyille tehtiin kolme rinnakkaista kompostia. Kompostointi tapahtui vetokaapissa ja se kesti yhteensä 14 päivää.



Kuva 4. Laboratoriomittakaavan kompostointikokeen koeasetelma.

Kompostimassan kuivumisen takia komposteja alettiin kastella kokeen neljäntenä päivänä. Ensimmäisessä kastelussa vettä lisättiin ensiksi 50 ml, jonka imeytyttyä toiset 50 ml. Kompostit käännettiin kokeen seitsemäntenä päivänä. Kompostimassa kaadettiin ämpäriin, jossa se sekoitettiin puutarhalapion avulla. Sekoituksen jälkeen kompostimassa siirrettiin takaisin Rottegrad-astioihin. Kokeen toisen viikon aikana vettä lisättiin päivittäin 10 ml. Veden lisäys suoritettiin aina ammoniakkimittausten jälkeen.

2.1.2 Mittaukset ja analyysit

Ammoniakkimittaukset suoritettiin Dräger-pumpun ja -ilmaisinputkien avulla (Ammoniakki 5/a CH20501). Rottegrad-astiat peitettiin muovikelmulla tunnin ajaksi ennen mittausta, jotta ammoniakkia ehtisi kertyä mitattavia pitoisuuksia. Ilmaisinputkien eteen asetettiin neula ja muutaman senttimetrin pituinen pala kumiletkua. Tämän avulla mittaus saatiin suoritettua kelmun läpi ilman, että kelmuun tiivistynyt vesi pääsi ilmaisinputkeen. Päivittäisten ammoniakkimittausten jälkeen kompostimassan lämpötila mitattiin lämpömittarilla. Lämpömittari asetettiin Rottegrad-astian reunan ja kompostimassan väliin.

Kompostimassan ravinnemäärytykset suoritti MetropoliLab Oy. Ravinnemäärytyksiä varten MetropoliLabille toimitettiin noin litra kompostinäytettä. Ravinnemäärytykset tehtiin kompostimassasta ennen kompostoinnin aloittamista sekä kokeen lopputilanteessa 14. päivänä. Kaikista kompostinäytteistä määritettiin ammoniumtyyppi (SFS-EN 13652) ja kokonaistyyppi, jonka määrytyksen suoritti SeiLab Oy (Kjeldahl). Lisäksi kokeen lopputilanteessa kaikista näytekomposteista määritettiin kompostimassan hiilidioksidintuotto (VTT tied. 2351). Kokonaistypen määrästä laskettiin edelleen kokonaistyyppihäviö kaavalla 1 (Paredes ym. 1996).

$$\text{kok-N-häviö (\%)} = 100 - 100 \left(\frac{(x^1 y^2)}{(x^2 y^1)} \right) \quad (1)$$

missä kok-N-häviö = kokonaistyyppihäviö mittausten välillä

x^1 = Alkuperäinen tuhkapitoisuus

x^2 = Lopputilanteen tuhkapitoisuus

y^1 = Alkuperäinen typpipitoisuus

y^2 = Lopputilanteen typpipitoisuus

Muihin laboratorioanalyysihin sovellettiin Itävaaran ym. (2006) Kompostin kypsyystestit -ohjekirjan menetelmäohjeita. Näytteiden pH-määrittämisä varten 250 ml dekantterilasiin mitattiin 50 ml kompostinäytettä, joka kaadettiin Schott-pulloon. Schott-pulloon lisättiin 250 ml tislattua vettä, jonka jälkeen pullo laitettiin ravistelijaan tunnin ajaksi. Ravistelu tapahtui 28 °C lämpötilassa. Ravistelun jälkeen pH-arvot mitattiin pH-analysaattorilla.

Kuiva-aine- ja tuhkapitoisuusmäärittämisä varten tyhjät upokkaat punnittiin, jonka jälkeen niihin annosteltiin noin 15 grammaa kompostinäytettä. Upokkaan ja kompostinäytteen yhteispaino punnittiin, jonka jälkeen näytteiden annettiin kuivua yön yli lämpökaapissa 103 °C lämpötilassa. Kuivat näytteet siirrettiin eksikaattoriin jäähtymään, jonka jälkeen näytteet punnittiin. Kokeen alkutilanteessa kaikista pitoisuuksista suoritettiin kolme rinnakkaista määrittäystä. Kokeen lopussa kaikista pitoisuuksista ja kaikista rinnakkaisnäytteistä suoritettiin kolme rinnakkaista määrittäystä. Kuiva-ainepitoisuuden määrittämisen jälkeen täydet upokkaat siirrettiin muhveliuuniin, jossa niitä poltettiin 550 °C lämpötilassa 3,5 tunnin ajan. Uunista näytteet siirrettiin eksikaattoriin jäähtymään ja lopuksi jäähtyneet näytteet punnittiin. Tuhkan massasta laskettiin näytteen tuhkapitoisuus, jonka avulla laskettiin edelleen orgaanisen aineksen osuus. Näytteiden tuhkapitoisuutta käytettiin orgaanisen aineksen häviön laskemiseen kokeen aikana; laskuihin käytettiin kaavaa 2 (Paredes ym. 1996).

$$\text{Org. häviö (\%)} = 100 - 100 \frac{(x^1(100 - x^2))}{(x^2(100 - x^1))} \quad (2)$$

missä Org. häviö = Orgaanisen aineksen häviö mittausten välillä

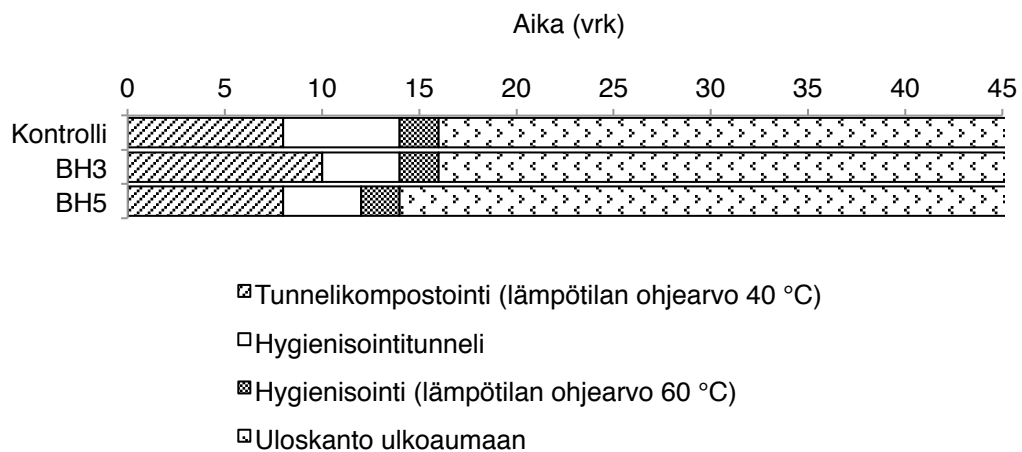
x^1 = Alkutilanteen tuhkapitoisuus

x^2 = Lopputilanteen tuhkapitoisuus

2.2 Laitosmittakaavan kompostointikoe

Laitosmittakaavan kompostointikoe suoritettiin Espoossa Ämmässuon jätteenkäsittelykeskuksessa. Kompostointi tapahtui samoissa kompostointitunneleissa ja samalla mittakaavalla kuin biojätteen kompostointi yleensä, joten kokeen tuloksia voidaan soveltaa suoraan käytäntöön. Laboratoriokokeiden tulosten perusteella käytettäviksi biohiilipitoisuuksiksi valittiin 3 % (BH3) ja 5 % (BH5) kompostimassan märkäpainosta. Biohiilikompostien lisäksi seurattiin yhtä kontrollikompostia, johon ei lisätty biohiiltä. Laitosmittakaavan kompostointikokeessa eri pitoisuuksilla ei ollut rinnakkaisia komposteja.

Ämmässuolla kompostointi tapahtui 28 m x 5 m x 6 m kompostointitunneleissa. Tunnelit täytettiin noin puolilleen niiden kokonaistilavuudesta. Laitosmittakaavan kompostoinnissa tunnelikompostointivaihe kesti yhteensä noin kaksi viikkoa. Kompostoinnin ensimmäinen vaihe kesti 8 - 10 päivää (Kuva 5). Ensimmäisen vaiheen aikana kompostointilaitoksen automaatiojärjestelmään tunnelien poistoilman ohjearvoksi oli asetettu 40 °C. Automaatiojärjestelmä sääteli kompostin lämpötilaa kiertoilmatunnelin tunneliläpän avulla. Jos poistoilman lämpötila nousi yli 40 °C:een, automaatiojärjestelmä avasi tunneliläppää siten, että raitisilman sisäänotto lisääntyi. Jos taas poistoilman lämpötila alkoi laskea ohjearvon alapuolelle, kääntyi tunneliläppä siten, että raitisilman sisäänotto väheni ja tunnelissa olevaa ilmaa kierrätettiin sellaisenaan.



Kuva 5. Koetunnelien kompostointiprosessin vaiheet aikajanoilla.

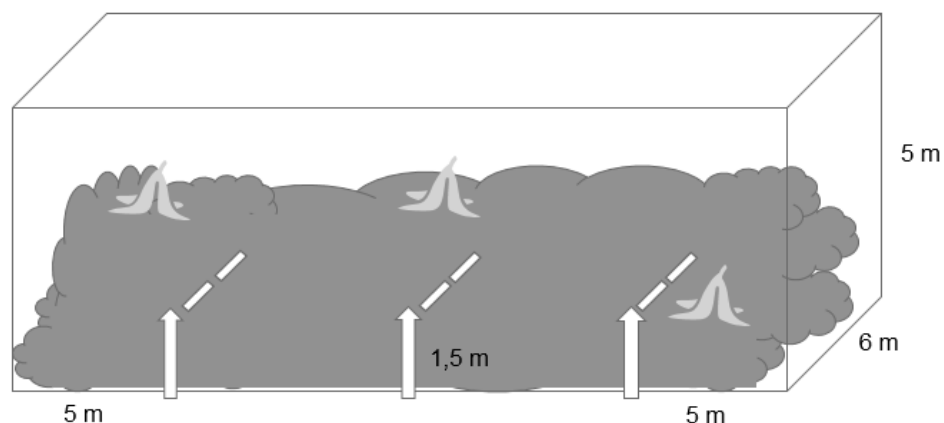
Ensimmäisen vaiheen jälkeen komposti siirrettiin ulos tunnelista pyöräkuormaajan avulla ja seulottiin. Seulonnassa muodostunut pienempi jae siirrettiin toiseen tunneliin hygienisointia varten ja suurempaa jaeä käytettiin kierrätystukiaineena seuraavien tunnelien täytöissä. Hygienisointitunneliin tuli kompostia siis useista eri tunnelista ja tämän seurauksena koetunnelien kompostimassat olivat hygienisointitunnelissa 4 - 6 päivää ennen varsinaista hygienisointia. Tämän vuoksi haihtuneen ammoniakkin määrää ei pystytty ensimmäisen tunnelikompostointivaiheen jälkeen enää seuraamaan. Seulonnan voidaan olettaa aiheuttaneen biohiilen konsentroituista, koska hajoamattomaan biojätteeseen ja tukiaineeseen verrattuna biohiili oli raekooltaan hyvin pientä.

Koepanokset eroteltiin hygienisointitunnelissa muovien avulla. Hygienisointi kesti kaksi vuorokautta, jonka aikana tunnelin poistoilman lämpötila oli 60 °C. Hygienisointivaiheessa tunneliin puhalletaan valmiiksi lämmitettyä ilmaa. Hygienisoinnin jälkeen komposti siirrettiin kypsyään ulkoaukoihin. Ulkoaukoissa koepanosten kompostoitumista pystyttiin seuraamaan vielä kuukauden ajan. Tämän jälkeen ulkoaukat käännettiin koneellisesti ja koepanokset sekoittuivat muuhun kompostimassaan. Ulkoaukoissa kompostointi jatkuu vuodenajasta riippuen neljästä kuuteen kuukauteen.

2.2.1 Näytteenotto

Kokeen alkutilanteen kompostinäytteet otettiin liukuhihnalta kompostimassan sekoituksen jälkeen. Lapiolla otettiin osanäytteitä, jotka siirrettiin 60 litran saaviin. Kokonaisnäytemäärä oli yhteensä noin 50 litraa. Näytteenotto kesti yhteensä noin 30 minuuttia. Tämän jälkeen näyte murskattiin Senfit Sample Mill 2013 SM-120 näytemurskaimella. Murskattu näyte sekoitettiin ja siitä otettiin kolme noin kolmen litran osanäytettä ravinnemäärityksiä varten sekä noin viiden litran osanäyte pH-määrityksiä varten.

Kompostimassan siirtojen yhteydessä näytteitä otettiin kolmesta kohtaa tunnelia. Ensimmäinen näytteenottokohta oli noin viisi metriä tunnelin etuseinästä, toinen näytteenottokohta oli noin tunnelin puolivälissä ja kolmas noin viisi metriä tunnelin takaseinästä (Kuva 6). Näistä kohdista kerättiin lapiolla osanäytteitä noin 1,5 metrin korkeudesta koko tunnelin leveydeltä, kuitenkin siten, että reunimmaiseta osanäytteet olivat yli puoli metriä tunnelin seinästä. Jokaisesta näytteenottokohdasta otettiin näytettä yhteensä noin 50 litraa. Näytteenoton jälkeen näytteet murskattiin näytemurskaimella ja sekoitettiin. Murskatusta ja sekoitetuista näytteistä otettiin kolmen litran näytteet laboratorioanalysejä varten.



Kuva 6. Kuvassa on havainnollistettu kompostimassa kompostointitunnelissa. Valkoiset katkoviivat kuvaavat näytteenottokohtia.

Laitosmittakaavan kokeessa kompostien stabiloitumisen seuraamista jatkettiin vielä ulkoaumoissa. Viimeinen seuranta tehtiin noin 1,5 kuukautta tunnelikompostoinnin alkamisen jälkeen. Ulkoauma avattiin pyöräkuormaajan avulla siten, että näytteet saatiin otettua kolmesta eri kohtaa ja mahdollisimman edustavasti koko auman syvyydeltä. Jokaisesta kohdasta kerättiin osanäytteitä yhteensä 50 litraa. Osanäytteet sekoitettiin, jonka jälkeen otettiin kolmen litran näyte ravinneanalyysijä varten. Jokaisen näytteenoton yhteydessä mitattiin kompostimassan lämpötila noin puolia metriä näytteenottokohdan pinnasta

2.2.2 Laboratorioanalyysit ja mittaukset

Laboratorioanalyysit suoritti MetropoliLab Oy. Näytteistä määritettiin kuiva-ainepitoisuus (SFS-EN 13040), tuhkapitoisuus (SFS-EN 13039), ammoniumtyppi (SFS-EN 13652) sekä kokonaistyyppi, jonka määrittäminen suoritti SeiLab Oy (Kjeldahl). Kompostimassan pH-arvojen määrittäminen suoritettiin Ämmässuolla ja niihin sovellettiin Itävaaran ym. (2006) Kompostin kypsyystestit -ohjekirjan menetelmäohjetta. Murskatusta ja sekoitetusta näytteestä otettua osanäytettä mitattiin 100 ml dekanterilasiin, johon lisättiin ionisoitua vettä siten, että kokonaistilavuudeksi tuli 500 ml. Seosta liuotettiin huoneenlämmössä tunnin ajan samalla sekoittaen. Tämän jälkeen pH-arvo määritettiin pH-analysaattorilla.

Haihtuneen ammoniakkin määrä mitattiin kompostointitunneleiden kiertoilmasta kahdesti päivässä Dräger-pumpun ja -ilmaisinputkien (Ammoniakki 5/a CH20501) avulla. Mittaukset suoritettiin aamuisin noin kello 9 ja iltapäivällä noin kello 14. Kuitenkin siten, että ensimmäinen mittaus suoritettiin tunnelin täytön jälkeisen päivän aamuna. Ilmaisinputkien eteen liitettiin pala kumilettoa ja neula ettei ilmanvaihtoputkien seiniin tiivistynyt vesi päässyt valumaan ilmaisinputkeen ja siten vääristämään mittaustuloksia. Tunneleiden raitisilmakierto suljettiin mittausten ajaksi.

Tunnelikompostoinnin aikana lämpötila-arvoina käytettiin tunnelin poistoilman lämpötilaa. Kyseistä lämpötila-arvoa käytetään myös viranomaisseurannassa. Kiertoilman lämpötila-arvot ja kiertoilmatunnelin tunneliläpän ohjearvo luettiin kompostointilaitoksen automaatiojärjestelmästä tulostetusta kaaviosta. Tunneliläpän ohjearvot luettiin ennen aamulla tehtyjä ammoniakkimittauksia. Kaikkien koetunneleiden puhalletun ilman tilavuusvirta oli noin 9000 m³/h ja se pysyi suunnilleen samalla tasolla tunnelikompostoinnin ensimmäisen vaiheen ajan.

2.3 Aineiston käsittely ja tilastolliset analyysit

Laboratoriomittakaavan kompostointikokeessa ensimmäisen päivän ammoniakkimittauksista ei saatu vertailukelpoisia tuloksia, joten ammoniakkikuvaajista puuttuu kokonaan ensimmäisen päivän tulokset. Ammoniakkia ja lämpötilaa ei mitattu kokeen viidentenä ja kuudentena päivänä. Kokeen toisella viikolla osa ammoniakkimittausten tuloksista jäi alle mittausravon, joka oli 5 ppm. Tällaiset mittaustulokset on ilmoitettu tuloksissa 2,5 ppm.

Tilastoanalyysiin käytettiin IBM SPSS Statistics 23 -ohjelmaa. Ennen varsinaisia tilastoanalyysijä aineistot esikäsiteltiin mittausrvirheiden ja selkeästi poikkeavin havaintojen varalta Boxplot-toiminnon avulla. Tämän perusteella laboratoriokokeiden BH3-kompostin alkutilanteen tuloksista poistettiin yksi selkeästi poikkeava mittaustulos kuiva-ainepitoisuudesta (45,8 %) ja yksi selkeästi poikkeava mittaustulos orgaanisen aineksen määrästä (49 %).

Analyysimenetelmänä käytettiin lineaarista regressioanalyysiä. Haihtuneen ammoniakin määrän regressioanalyysissä käytettiin mittausten yhteenlaskettua ammoniakin määrää ja muiden muuttujien analyysissä käytettiin havaintojen keskiarvoja.

3 Tulokset

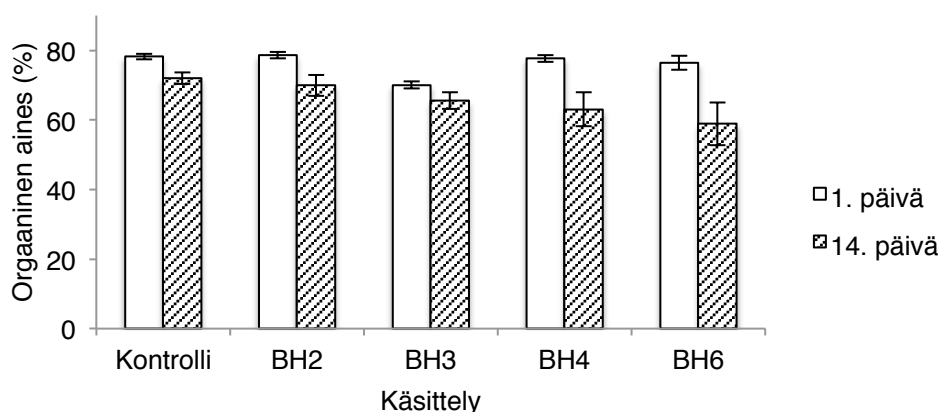
3.1 Laboratoriomittakaavan kokeen tulokset

Biohiilen lisäyksellä ei ollut vaikutusta kompostien pH-arvoihin, orgaanisen aineksen (VS), kuiva-aineen, kokonaistypen ja ammoniumtypen määriin kokeen alkutilanteessa (Taulukko 1). Kompostimassan heterogeenisyys todennäköisesti selittää kemiallisten ominaisuuksien vaihtelut. Kontrollikompostien massojen keskiarvo oli hieman suurempi kuin biohiilikomposteilla.

Taulukko 1. Koekompostien massat ja kemialliset ominaisuudet ennen kompostointia (*keskiarvo \pm keskihajonta, $n = 3$*). (Orgaaninen aines %: näytteen kuiva-aineen sisältämä orgaaninen aines, Kuiva-aine %: näytteen kuiva-aine prosentteina alkuperäisestä näytteestä).

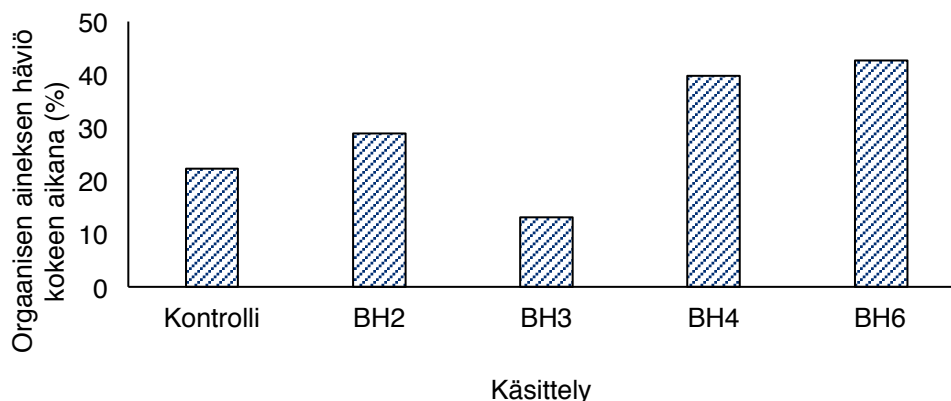
	Kontrolli	BH2	BH3	BH4	BH6
Massa (g)	816,5 \pm 19,0	658,7 \pm 2,9	647,9 \pm 13,4	631,9 \pm 28	638,1 \pm 7,3
pH	7,1	7,1	7	6,7	7
Orgaaninen aines (%)	78,2 \pm 0,8	78,6 \pm 1,0	70,0 \pm 1,0	77,7 \pm 1,0	76,4 \pm 2,0
Kuiva-aine (%)	33,4 \pm 1,0	35,6 \pm 0,8	38,7 \pm 2,0	35,9 \pm 0,6	38,0 \pm 1,3
Kokonaistyyppi (mg/kg ka)	20000	26000	25000	25000	25000
Ammoniumtyppi (mg/l)	580	440	730	370	400

Biohiilen lisäyksen jälkeen ennen kompostointia kompostimassan orgaanisen aineksen osuuden keskiarvot vaihtelivat 70 - 78 % välillä. Kokeen lopussa orgaanisen aineksen keskiarvo oli suurin kontrollikomposteilla ja se pienenee lineaarisesti biohiilipitoisuuden kasvaessa (Kuva 7). Biohiilen lisäys selittää orgaanisen aineksen määrää kokeen lopputilanteessa erittäin merkitsevästi ($R^2 = 0,95$, $p = 0,003$).



Kuva 7. Kompostimassan orgaanisen aineksen määrä eri käsittelyillä ennen kokeen aloitusta ja kokeen lopetuksen yhteydessä (1. päivä, keskiarvo + keskihajonta, $n=3$ ja 14. päivä, keskiarvo \pm keskihajonta, $n=9$). (Orgaaninen aines %: näytteen kuiva-aineen sisältämä orgaaninen aines).

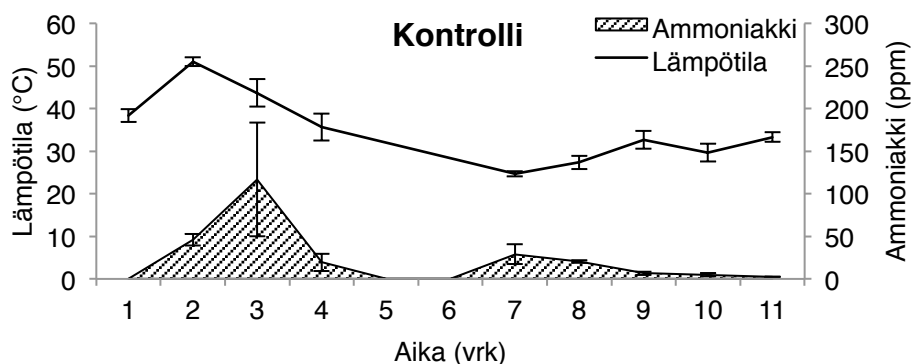
Kuvassa 8 on esitetty kompostien tuhkapitoisuuksista laskettu orgaanisen aineksen häviö kokeen aikana. Vaikka orgaanisen aineksen häviö ei ollut tilastollisesti merkitsevä, on trendi samanlainen kuin edellä kuvatussa orgaanisen aineksen määrän muutoksessa.



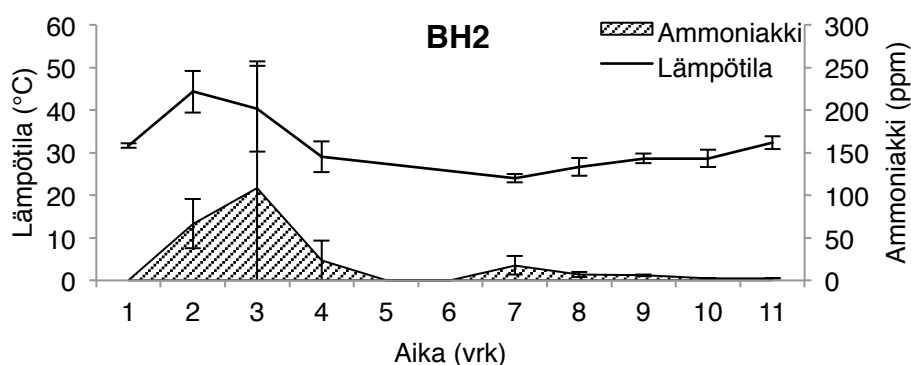
Kuva 8. Eri käsittelyiden tuhkapitoisuuden keskiarvoista laskettu orgaanisen aineksen häviö kokeen aikana.

Kaikilla käsittelyillä kompostimassan korkeimmat lämpötila-arvot ajoittuivat kokeen toiseen päivään. Suurimmat eroavaisuudet ammoniakkikuvaajissa eri käsittelyiden välillä havaittiin kokeen toisena ja kolmantena päivänä (Kuvat 9a -

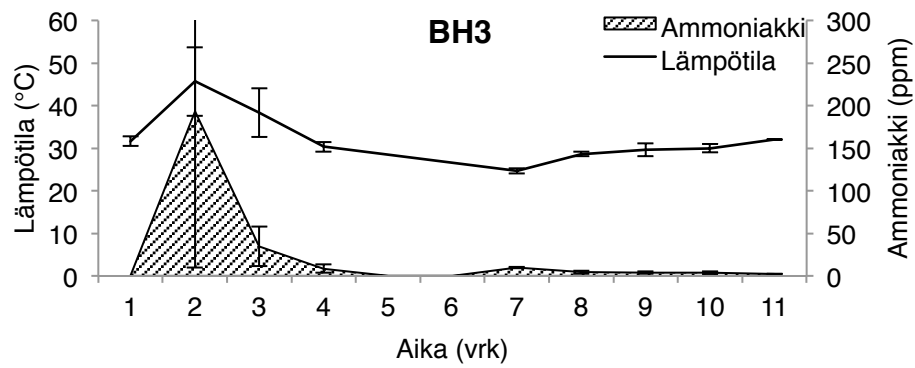
9e). Kontrolli- ja BH2-kompostin ammoniakkin haihtuminen oli suurinta kokeen kolmantena päivänä, kun lämpötila oli alkanut hieman laskea (Kuvat 9a ja 9b). Sen sijaan BH3-, BH4- ja BH6-komposteilla terävämpi piikki ammoniakkin haihtumisessa tapahtui jo kokeen toisena päivänä, kun kompostimassan lämpötila oli korkeimmillaan. Kokeen toisella viikolla haihtuneen ammoniakkin määrät olivat ensimmäiseen viikkoon verrattuna todella pieniä. Kontrollikompostien ja BH2-kompostien haihtuneen ammoniakkin määrän keskiarvot nousivat kompostien käynnön jälkeen hieman enemmän kuin suuremmilla biohiilipitoisuuksilla (Kuvat 9a - 9d). Biohiilen lisäyksellä ei havaittu vaikutusta yhteenlasketun haihtuneen ammoniakkin määrään.



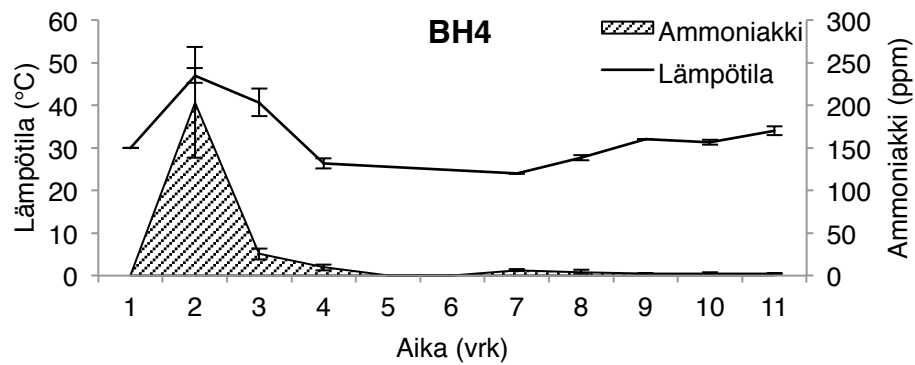
Kuva 9a. Kontrollikompostien mitattu haihtuneen ammoniakkin määrä ja kompostimassan lämpötila eri ajanhetkillä (keskiarvo \pm keskihajonta, $n=3$).



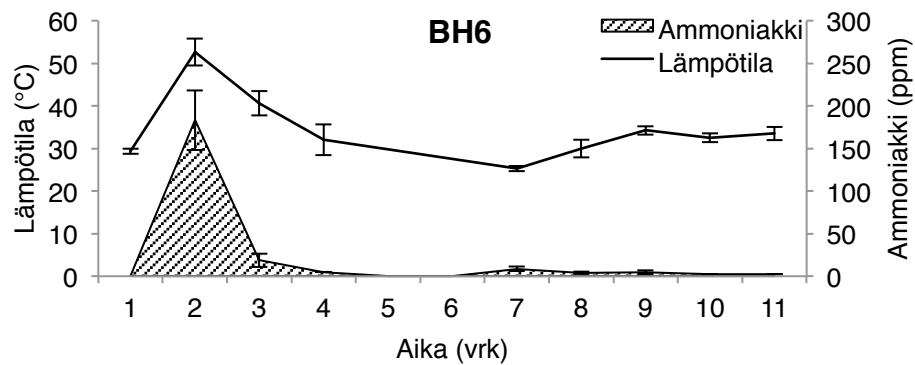
Kuva 9b BH2-kompostien mitattu haihtuneen ammoniakkin määrä ja kompostimassan lämpötila eri ajanhetkillä (keskiarvo \pm keskihajonta, $n=3$).



Kuva 9c. BH3-komposteista mitattu haihtuneen ammoniakin määrä ja kompostimassan lämpötila eri ajanhetkillä (*keskiarvo ± keskihajonta, n=3*).



Kuva 9d BH4-komposteista mitattu haihtuneen ammoniakin määrä ja kompostimassan lämpötila eri ajanhetkillä (*keskiarvo ± keskihajonta, n=3*).



Kuva 9e. BH6-komposteista mitattu haihtuneen ammoniakin määrä ja kompostimassan lämpötila eri ajanhetkillä (*keskiarvo ± keskihajonta, n=3*).

Taulukossa 2 on esitetty koekompostien kemialliset ominaisuudet sekä kompostien massat kokeen lopputilanteessa. Kaikkien kompostien massat ja ammoniumtypen määrät laskivat kokeen aikana. Vaikka komposteista haihtui typpeä ainakin ammoniakkin muodossa, pysyi kokonaistypen määrä samoissa lukemissa kokeen ajan. Syynä tähän voidaan pitää orgaanisen aineksen hajoamisesta seurannutta typen konsentroitumista (Franke-Whittle ym. 2014). Biohiilellä ei ollut vaikutusta kompostimassan kokonaistyyppihäviöön kokeen aikana.

Taulukko 2. Kompostien massat ja kemialliset ominaisuudet kokeen lopussa (*keskiarvo ± keskihajonta, n = 3*). Orgaanisen aineksen tilastollisesti merkitsevät tulokset on lihavoitu. (Orgaaninen aines %: näytteen kuiva-aineen sisältämä orgaaninen aines, Kuiva-aine %: näytteen kuiva-aine prosentteina alkuperäisestä näytteestä).

	Kontrolli	BH2	BH3	BH4	BH6
Massa (g)	606,1 ± 4,2	528,3 ± 8,8	511,6 ± 24,7	505,5 ± 13,2	518,5 ± 13
pH	8,6 ± 0,1	8,3 ± 0,3	8,1 ± 0,1	8,3 ± 0,3	8,1 ± 0,3
Orgaaninen aines (%)	72 ± 1,7	69,9 ± 3,0	65,5 ± 2,4	63,0 ± 4,9	58,9 ± 6,1
Kuiva-aine (%)	40,9 ± 1,2	39,9 ± 1,7	40,0 ± 1,4	41,8 ± 1,8	43,7 ± 2,3
Kokonaistyyppi (mg/kg ka)	25000 ± 2000	26000 ± 3000	27000 ± 1000	26000 ± 2000	25000 ± 1000
Ammoniumtyppi (mg/l)	223,3 ± 83,9	135,0 ± 155,9	79,3 ± 5,8	90,0 ± 62,4	79,7 ± 69,8
CO ₂ -tuotto (mg CO ₂ /vrk)	7,7 ± 0,5	8,0 ± 2,0	5,8 ± 0,7	8,2 ± 1,5	6,2 ± 1,3

3.2 Laitosmittakaavan kokeen tulokset

Taulukossa 3 on esitetty kompostien massat ja kemialliset ominaisuudet kokeen alussa. Kompostimassojen pH-arvot olivat hieman korkeammat kuin laboratoriomittakaavan kokeessa.

Taulukko 3. Koetunneleiden kompostien massat ja kemialliset ominaisuudet kokeen alussa (*keskiarvo ± keskihajonta, n = 3*). (Orgaaninen aines %: näytteen kuiva-aineen sisältämä orgaaninen aines, Kuiva-aine %: näytteen kuiva-aine prosentteina alkuperäisestä näytteestä).

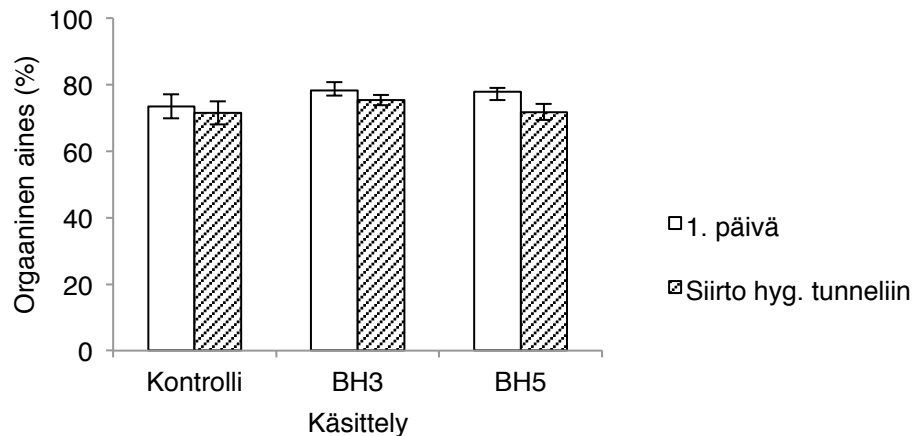
	Kontrolli	BH3	BH5
Kompostin kokonaismassa (t)	281,2	289,8	280,9
Biohiilen massa (t)		8,0	13,7
Biohiilen osuus (%)		2,8	4,9
Mädätteen massa (t)	70,6	73,0	72,8
Mädätteen osuus (%)	25,1	25,2	25,9
pH	8,2 ± 0,17	8,5 ± 0,04	8,1 ± 0,05
Kuiva-aine (%)	44,2 ± 3,7	41,2 ± 0,8	46,6 ± 1,6
Orgaaninen aines (%)	73,4 ± 3,7	78,2 ± 2,6	77,8 ± 1,2
Ammoniumtyppi (mg/l)	230 ± 61	507 ± 31	417 ± 68
Kokonaistyyppi (mg/kg ka)	32000 ± 2000	33000 ± 6000	27000 ± 1000

Kompostointitunnelien automaatiojärjestelmään poistoilman lämpötilan ohjearvoksi oli asetettu 40 °C ennen kääntöä ja 60 °C ennen tunnelikompostoinnin jälkeistä uloskantoa. Ulkoauomoista tehdyissä mittauksissa lämpötilojen vaihtelu oli merkillepantavan suurta (Taulukko 4). Erot ulkoauomojen seurannassa tehdyissä lämpötilamittauksissa ja näytteenoton aikana tehdyissä lämpötiloissa ovat todennäköisesti seurausta siitä, että kompostimassa käännettiin pyöräkuormaajan avulla ennen näytteenottoa ja lämpötilat olivat suurempia syvemmällä aumassa kuin puolen metrin syvyydellä kompostin pinnasta, josta seurantamittaukset tehtiin.

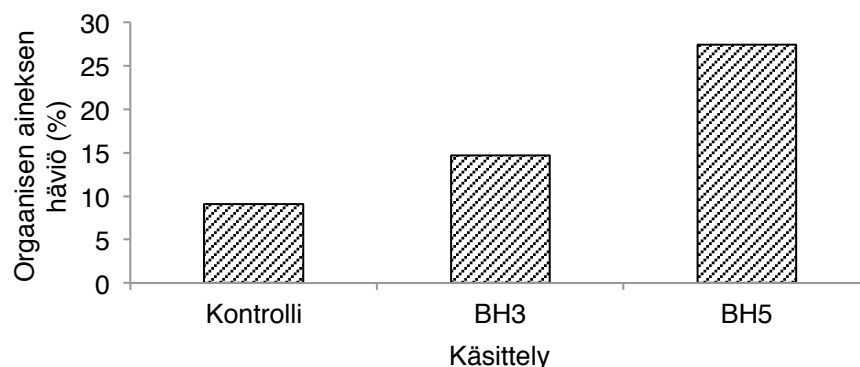
Taulukko 4. Kompostimassan lämpötilat kokeen aikana (*keskiarvo ± keskihajonta*).

	Lämpötila Kontrolli (°C)	Lämpötila BH3 (°C)	Lämpötila BH5 (°C)
Kääntö (n=9)	44 ± 8	38 ± 5	42 ± 2
Uloskanto (n=9)	60 ± 5	42 ± 12	62 ± 5
Ulkoauoma 1 kk kokeen alusta (n=7)	22 ± 19	24 ± 15	32 ± 15
Ulkoauoma 1,5kk kokeen alusta (n=6)	17 ± 11	27 ± 13	21 ± 3
Ulkoauoman näytteenoton aikana (n=3)	29 ± 4	49 ± 12	42 ± 8

Kaikkien kompostien orgaanisen aineksen määrät laskivat tunnelikompostoinnin ensimmäisen vaiheen aikana (Kuva 10). Tulokset eivät ole tilastollisesti merkitseviä, mutta tuloksissa voidaan havaita viitteitä siitä, että biohiilen lisäyksellä olisi samanlainen vaikutus kuin laboratoriokokeissa havaituissa orgaanisen aineksen määrissä sekä orgaanisen aineksen häviössä (Kuva 11).



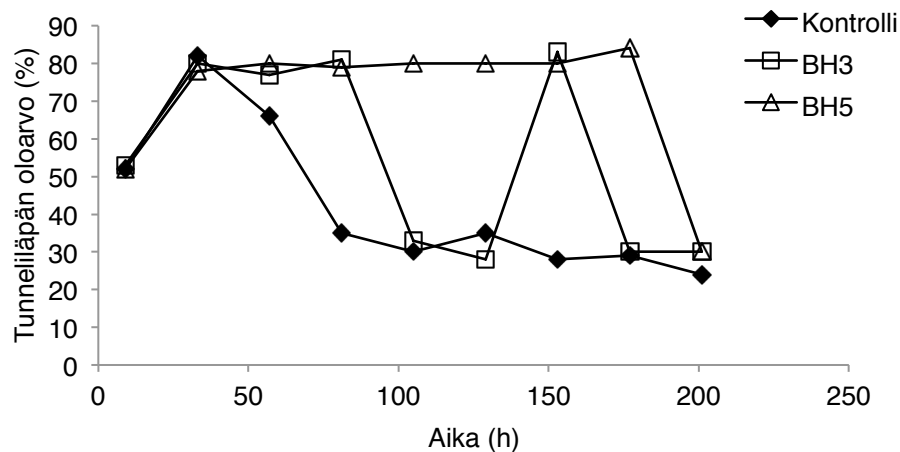
Kuva 10. Kompostimassan orgaanisen aineksen määrä eri käsittelyillä kokeen alussa ja hygienisointitunneliin siirrettäessä (*keskiarvo ± keskihajonta, n=3*). (Orgaaninen aines %: näytteen kuiva-aineen sisältämä orgaaninen aines).



Kuva 11. Eri käsittelyiden tuhkapitoisuuden keskiarvoista laskettu orgaanisen aineksen häviö tunnelikompostoinnin ensimmäisen vaiheen aikana.

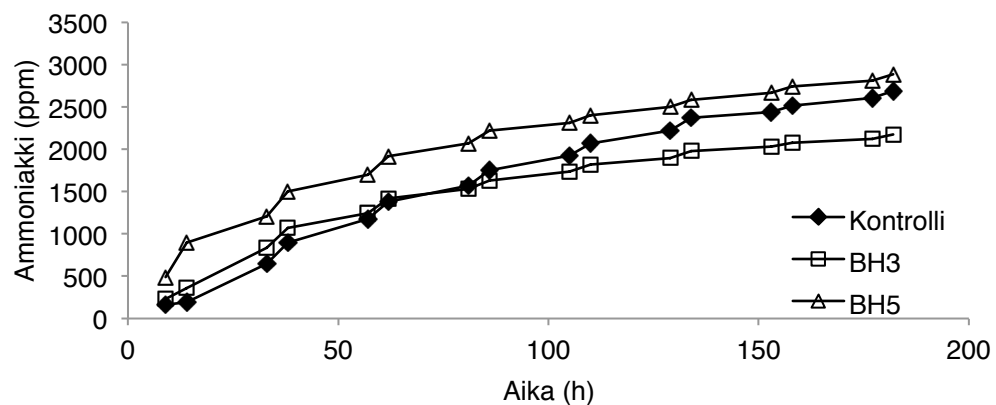
Tunneliläpän oloarvo kertoo kuinka paljon tunneliin on puhallettu raitista ilmaa ja kuinka paljon ilmaa on kierrätetty tunnelissa sellaisenaan. Mitä suurempi arvo kuvaajassa on, sitä enemmän tunneliin on puhallettu raitista ilmaa.

Biohiilitunneleissa oloarvot olivat suurempia kuin kontrollitunnelissa (Kuva 12). Biohiili lisäsi kompostimassan lämmöntuottoa, minkä takia automaatiojärjestelmä pyrki jäähdyttämään kompostimassaa lisäämällä ilman vaihtuvuutta tunneliläpän avulla.



Kuva 12. Koetunneleiden kiertoilmatunneleiden tunneliläppien oloarvot tunnelikompostoinnin ensimmäisessä vaiheessa.

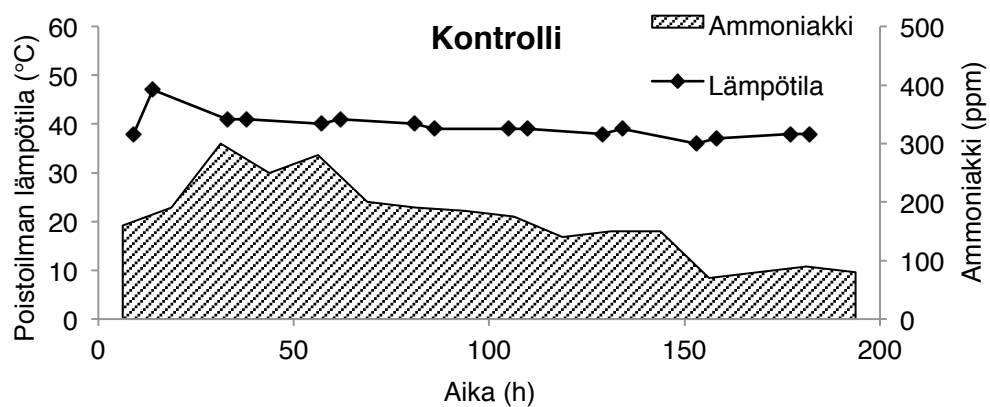
Biohiilen lisäyksellä ei ollut vaikutusta yhteenlasketun haihtuneen ammoniakin määrään.



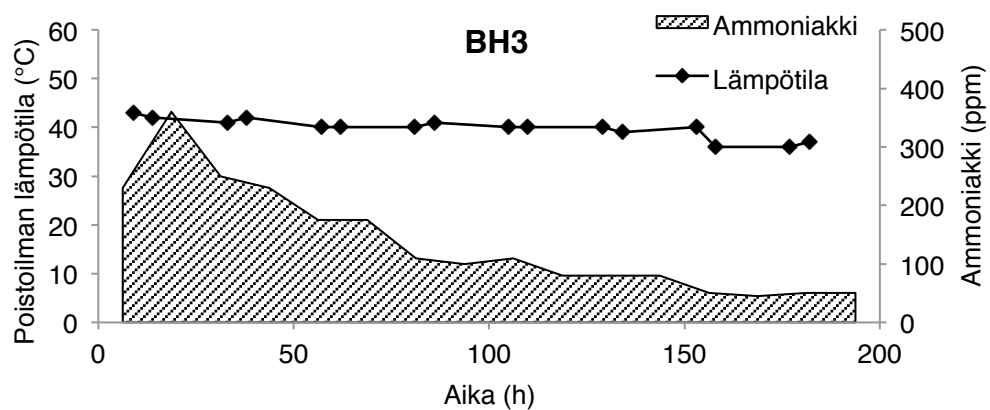
Kuva 13. Koetunneleiden kumulatiivinen ammoniakkipitoisuus tunnelikompostoinnin ensimmäisen vaiheen aikana.

Kontrollikompostin ja BH3-kompostin poistoilman lämpötilat pysyivät koko ensimmäisen tunnelikompostointivaiheen ajan hyvin lähellä ohjearvoa 40 °C, joka automaatiojärjestelmään oli annettu. BH5-tunnelin poistoilman lämpötila oli selvästi muita koetunneleita korkeampi kahden ensimmäisen vuorokauden aikana (Kuva 14). BH5-tunnelin poistoilman lämpötila alkoi laskea tunnelin ohjearvon tasolle vasta kokeen neljäntenä päivänä. Suurimmat poistoilman lämpötilaerot olivat kokeen toisena päivänä, jolloin BH5-tunnelin poistoilman lämpötila oli 10 °C korkeampi kuin kontrolli- ja BH3-tunnelissa

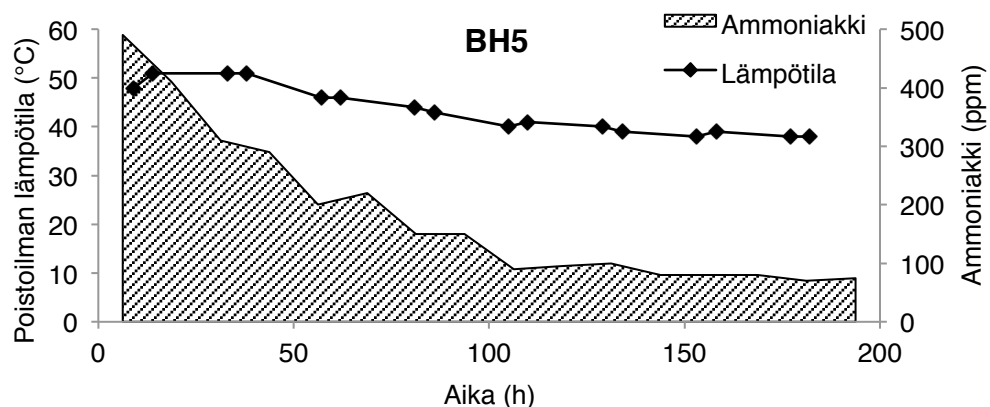
BH5-tunnelista mitattiin myös kokeen suurimmat haihtuneen ammoniakin määrät. BH5-tunnelin haihtuneen ammoniakin pitoisuus oli ensimmäisen vuorokauden aamumittauksessa 490 ppm (Kuva 14c). Kuitenkin kokeen kolmantena päivänä ammoniakkipitoisuudet laskivat samalle tasolle kontrollitunnelin kanssa. BH3-tunnelin poistoilman lämpötila pysyi lähimpänä tunnelin poistoilman lämpötilan ohjearvoa tunnelikompostoinnin ensimmäisen vaiheen aikana (Kuva 14b). BH3-tunnelin korkein haihtuneen ammoniakin määrä 360 ppm havaittiin ensimmäisen vuorokauden toisessa mittauksessa. Toisen vuorokauden mittauksissa BH3-tunnelin ammoniakkipitoisuudet olivat jo pienempiä kuin kontrollitunnelin ja pysyivät myös pienempinä tunnelikompostoinnin ensimmäisen vaiheen ajan. BH3-tunnelissa mitattiin tunnelikompostoinnin ensimmäisen vaiheen pienimmät haihtuneen ammoniakin määrät. Kontrollikompostin korkein haihtuneen ammoniakin määrä 300 ppm havaittiin toisen vuorokauden aamumittauksessa (Kuva 14a). Tämän jälkeen ammoniakkipitoisuudet alkoivat laskea.



Kuva 14a. Kontrollitunnelin ammoniakkimittausten tulokset ja tunnelinpoistoilman lämpötila-arvot eri ajanhetkillä.

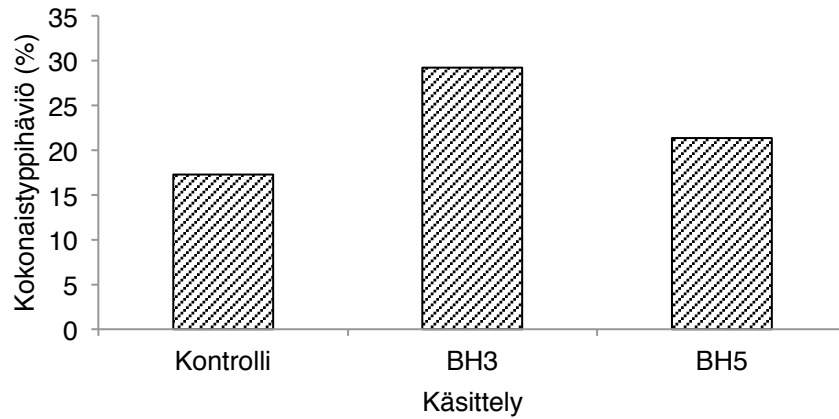


Kuva 14b. BH3-tunnelin ammoniakkimittausten tulokset ja tunnelin poistoilman lämpötila-arvot eri ajanhetkillä.



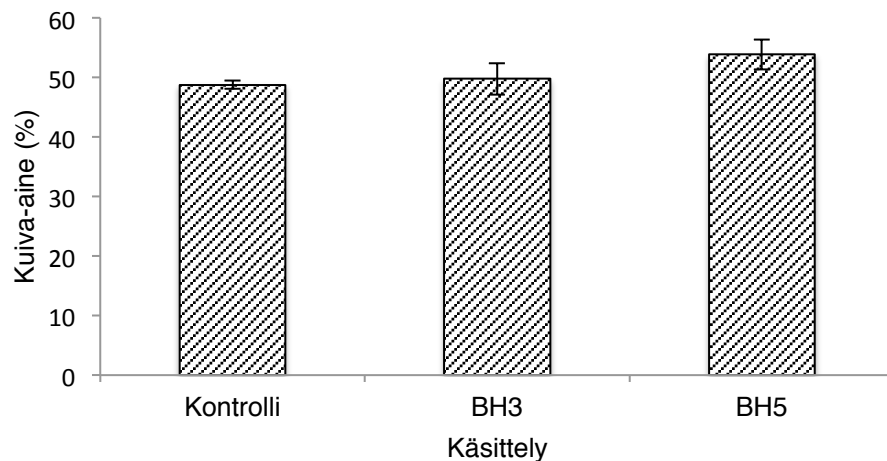
Kuva 14c. BH5-tunnelin ammoniakkimittausten tulokset ja tunnelin poistoilman lämpötila-arvot eri ajanhetkillä.

Biohiilellä ei ollut vaikutusta kokonaistyyppihäviöön tunnelikompostoinnin ensimmäisen vaiheen aikana (Kuva 15).



Kuva 15. Kokonaistyyppihäviö ensimmäisen tunnelikompostointivaiheen aikana.

Kompostit, joihin oli lisätty biohiiltä, olivat merkitsevästi kuivempia uloskannon yhteydessä (Kuva 16). Biohiilen lisäys selittää tilastollisesti merkitsevästi kuiva-ainepitoisuutta kompostien uloskannon yhteydessä ($R^2 = 0,423$, $p = 0,034$).



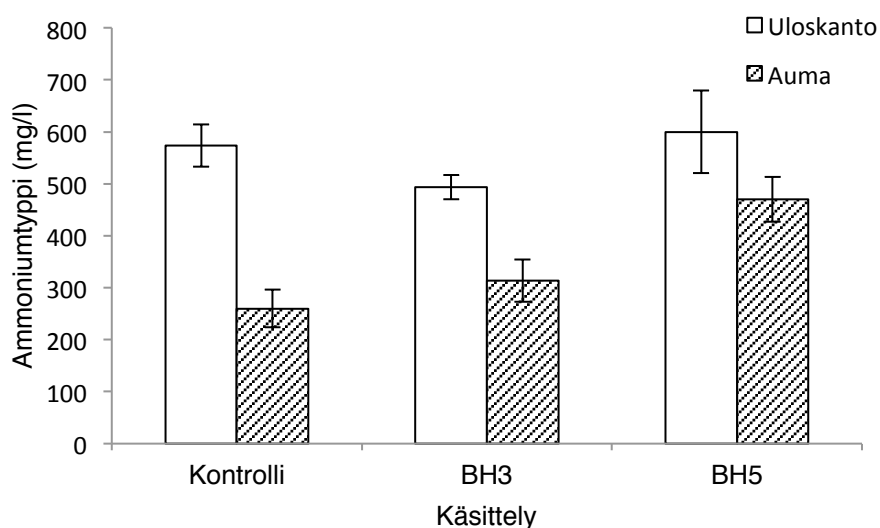
Kuva 16. Kompostimassan kuiva-ainepitoisuudet uloskannon yhteydessä (*keskiarvo ± keskihajonta*, $n=3$). (Kuiva-aine %: näytteen kuiva-aine prosentteina alkuperäisestä näytteestä).

Uloskannon yhteydessä tehdyissä mittauksissa kaikkien kompostien pH-arvot olivat nousseet ja orgaanisen aineksen osuudet laskeneet kokeen alusta (Taulukko 5.)

Taulukko 5. Kompostimassan kemialliset ominaisuudet uloskannon yhteydessä (*keskiarvo ± keskihajonta, n=3*). Kuiva-ainepitoisuuden tilastollisesti merkitsevät tulokset on lihavoitu. (Orgaaninen aines %: näytteen kuiva-aineen sisältämä orgaaninen aines, Kuiva-aine %: näytteen kuiva-aine prosentteina alkuperäisestä näytteestä).

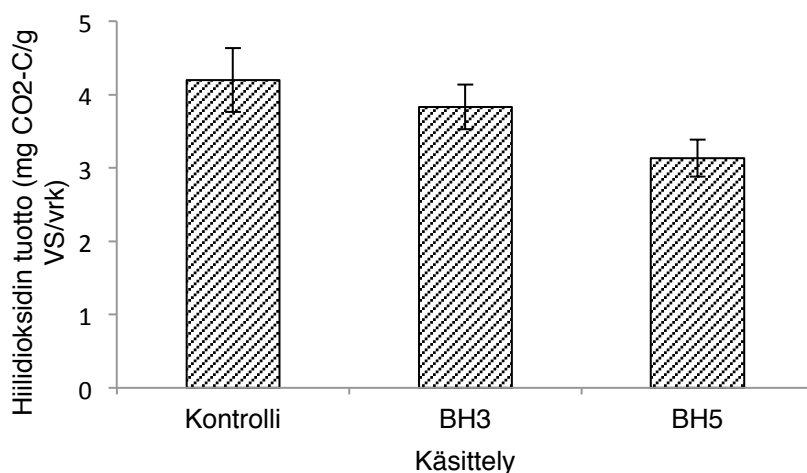
	Kontrolli	BH3	BH5
pH	8,9 ± 0,0	9,0 ± 0,1	8,8 ± 0,1
Kuiva-aine (%)	48,8 ± 0,7	49,8 ± 2,7	53,9 ± 2,5
Orgaaninen aines (%)	58,8 ± 3,1	63,9 ± 1,5	60,8 ± 3,1
Ammoniumtyppi (mg/kg ka)	573 ± 40	493 ± 23	600 ± 79
Kokonaistyyppi (mg/l)	30000 ± 1000	27000 ± 0	28000 ± 1000

Biohiilen lisäys kompostimassaan selittää merkitsevästi ammoniumtypen määrää kokeen lopputilanteessa ($R^2 = 0,717, p = 0,002$) (Kuva 17).



Kuva 17. Kompostimassan ammoniumtypen pitoisuudet uloskannon yhteydessä ja ulkoauaman viimeisessä seurannassa. (*keskiarvo ± keskihajonta, n=3*).

Hiilidioksidin tuotolla kuvataan kompostin mikrobitoiminnan aktiivisuutta. Hiilidioksidin tuotto vähenee lineaarisesti biohiilipitoisuuden kasvaessa (Kuva 18). Biohiilen lisäys selittää merkitsevästi hiilidioksidin tuottoa kokeen viimeisessä seurannassa ($R^2 = 0,609$, $p = 0,008$).



Kuva 18. Kompostimassan hiilidioksidin tuotto ulkoauaman viimeisessä seurannassa (*keskiarvo ± keskihajonta*, $n=3$). (VS: näytteen sisältämä orgaaninen aines).

Taulukossa 6 on esitetty kompostimassan kemialliset ominaisuudet ulkoauamasta tehdystä viimeisestä seurannasta.

Taulukko 6. Kompostimassan kemialliset ominaisuudet ulkoauaman viimeisessä seurannassa (*keskiarvo ± keskihajonta*, $n=3$). Ammoniumtypen ja hiilidioksidin tuoton tilastollisesti merkitsevät tulokset on lihavoitu. (Orgaaninen aines %: näytteen kuiva-aineen sisältämä orgaaninen aines, Kuiva-aine %: näytteen kuiva-aine prosentteina alkuperäisestä näytteestä).

	Kontrolli	BH3	BH5
pH	8,9 ± 0,1	8,9 ± 0,0	8,9 ± 0,0
Kuiva-aine (%)	40,3 ± 1,0	43,6 ± 2,7	42,5 ± 2,7
Orgaaninen aines (%)	61,0 ± 0,4	61,9 ± 3,7	60,3 ± 0,7
Ammoniumtyppi (mg/kg ka)	260 ± 36	313 ± 40	470 ± 44
Kokonaistyyppi (mg/l)	24000 ± 2000	24000 ± 2000	25000 ± 2000
Hiilidioksidin tuotto	4,2 ± 0,4	3,8 ± 0,3	3,1 ± 0,3

4 Tulosten tarkastelu

4.1 Biohiilen vaikutus kompostimassan ominaisuuksiin ja aktiivisuuteen

Tutkimuksen tulosten perusteella biohiilen lisäyksellä oli tilastollisesti merkitsevä vaikutus orgaanisen aineksen hajoamiseen laboratoriomittakaavan kompostointikokeessa (Kuva 7). Laitosmittakaavan kokeessa tulokset orgaanisen aineksen hajoamisessa eivät olleet tilastollisesti merkitseviä, mutta tulosten trendi oli samanlainen kuin laboratoriomittakaavan kokeessa (Kuva 7 ja Kuva 10). Vaikka kompostoitavan jätteen alkuperä oli erilainen, tukevat kokeissa saadut tulokset aikaisempia tutkimuksia biohiilen lisäyksen vaikutuksista orgaanisen aineksen hajoamiseen (Malinska ym. 2014; Sánchez-Garcia ym. 2015; Vandecasteele ym. 2016). Franke-Whittle ym. (2014) havaitsivat tutkimuksessaan, että ilman biohiililisäystä seulotun kompostin, viherjätteen ja mädätteen sekoituksen kompostoinnissa merkittävin muutos orgaanisen aineksen hajoamisessa tapahtui kahden ensimmäisen viikon aikana. Laboratorio- ja laitosmittakaavan kokeiden tulosten perusteella voidaan arvioida, että myös biohiilen lisäyksellä oli vaikutus orgaanisen aineksen hajoamiseen juuri kompostoinnin ensimmäisten viikkojen aikana.

Vaikka laitosmittakaavan kokeessa orgaanisen aineksen muutos ei ollut tilastollisesti merkitsevä (Kuva 10), tukevat biohiilen lisäyksen vaikutusta orgaanisen aineksen hajoamiseen ja kompostimassan aktiivisuuteen laboratorioskokeen samanlaisen trendin lisäksi: BH5-tunnelin korkeampi poistoilman lämpötila kompostoinnin ensimmäisinä päivinä (Kuva 14c), biohiilen vaikutus hiilidioksidin tuottoon kokeen lopussa (Kuva 18) sekä BH3- ja BH5-tunneleiden tunneliläppien korkeammat oloarvot (Kuva 12). Tunneliläppien korkeat oloarvot tarkoittavat sitä, että esimerkiksi BH5-tunnelin kohdalla automaatiojärjestelmä pyrki jäähdyttämään kompostimassaa melkein koko tunnelikompostoinnin ensimmäisen vaiheen ajan (Kuva 12).

Toisaalta, kun vertaillaan laboratoriokokeen ja laitosmittakaavan kokeen alkutilanteita, on tärkeä huomioida, että kompostimassa murskattiin ennen laboratoriomittakaavan kompostointikoetta. Kompostimassan murskaus lisää partikkeleiden pinta-alaa ja siten myös mikrohabitaattien määrää. Koska orgaanisen aineksen hajoaminen on voimakkaampaa partikkeleiden pinnalla kuin niiden sisällä (Lehmann ym. 2011), voidaan arvioida, että kompostin murskauksella oli vaikutusta myös orgaanisen aineksen hajoamiseen laboratoriomittakaavan kokeessa. Saatuihin tuloksiin saattoi osaltaan vaikuttaa myös se, että laboratoriokokeen kesto oli kaksi viikkoa ja laitosmittakaavan kokeen alkuvaiheen kesto oli 8 - 10 päivää, koska orgaanisen aineksen hajoaminen on nopeinta kompostoinnin ensimmäisten viikkojen aikana (Franke-Whittle ym. 2014).

4.1.1 Hiilidioksidin tuotto

Kompostin stabiilisuuden määrittämiseen voidaan käyttää useita eri menetelmiä, mutta sitä kuvaa parhaiten hiilidioksidin tuotto, koska se kuvaa suoraan kompostimassan mikrobiaktiivisuutta (Itävaara ym. 2006). Itävaaran ym. (2006) Kompostin kypsyystestit -menetelmäohjeessa kypsän kompostin hiilidioksidin tuoton raja-arvoksi on määritetty alle 2 mg CO₂-C/g VS/vrk. Ulkoauimoista mitatun hiilidioksidin tuoton perusteella mikään komposteista ei ollut vielä kypsää, mutta biohiilellä oli tilastollisesti merkitsevä vaikutus kompostimassan hiilidioksidin tuottoon kokeen viimeisessä seurannassa (Kuva 18). Tämän perusteella voidaan arvioida, että biohiilen lisäys nopeutti kompostin stabiloitumista. Biohiilikompostien nopeampaa stabiloitumista tukee myös biohiilen vaikutus orgaanisen aineksen hajoamiseen. Sánchez-Garcia ym. (2015) havaitsivat 3 % (kuivapainosta) biohiilen lisäyksellä samanlaisia vaikutuksia kompostin kypsymisnopeuteen. Kompostin nopeammalla kypsymisellä on myös taloudellinen merkitys, koska sen avulla pystytään mahdollisesti laskemaan kompostoinnin tuotantokustannuksia ja säästämään kompostien jälkikypsytykseen tarvittavaa tilaa (Sánchez-Garcia ym. 2015; Vandecasteele ym. 2016).

4.1.2 pH

Biohiilellä ei havaittu vaikutusta kokeiden alkutilanteen pH-arvoihin (Taulukko 1 ja Taulukko 3), mutta kaikkien kompostien pH-arvoja voidaan pitää optimaalisina kompostoinnin kannalta. Sundbergin ym. (2004) tutkimuksen mukaan alhaiset pH-arvot (<6,5) yhdessä korkeiden lämpötilojen kanssa saattavat hidastaa kompostointiprosessin siirtymistä termofiilivaiheeseen kompostoinnin alkuvaiheessa ja siten hidastaa koko kompostointiprosessia. Kaikkien kompostien pH-arvojen kehitys oli kompostoinnin aikana samansuuntainen ja biohiilellä ei havaittu vaikutusta kompostien pH-arvoihin. Esimerkiksi Wang ym. (2013) havaitsivat, että biohiilen lisäys kompostiin kasvatti kompostimassan pH-arvoja. Tässä tutkimuksessa havaittua pH-arvojen kehitystä voidaan pitää kuitenkin yhtenä merkinä aktiivisesta kompostoitumisesta. Sundbergin ym. (2004) mukaan toimivan kompostointiprosessin aikana kompostimassan pH-arvot nousevat yleisesti välille 8 - 9.

4.1.3 Kuiva-aine

Biohiilen lisääminen ja sen huokoinen rakenne parantavat kompostimassan ilmavuutta (Sonoki ym. 2013) ja sillä on edelleen vaikutusta kompostimassan kuiva-ainepitoisuuteen (Steiner ym. 2010). Tunnelikompostoinnin ensimmäisen vaiheen jälkeen biohiilellä ei havaittu vaikutusta kompostimassan kuiva-ainepitoisuuteen, vaikka tunneliläppien oloarvojen perusteella biohiilitunneleihin puhallettiin enemmän raitista ilmaa. Kuitenkin uloskannon yhteydessä biohiilen lisäys kasvatti tilastollisesti merkitsevästi kompostimassan kuiva-ainepitoisuutta (Kuva 16). Tulokset tukevat esimerkiksi Steinerin ym. (2010) sekä Vandecasteele ym. (2016) tutkimusten tuloksia. Toisaalta Malińskan ym. (2014) mukaan biohiili taas saattaisi lisätä kompostimassan vedenpidätyskykyä kompostoinnin aikana.

4.2 Biohiilen vaikutus typpiyhdisteisiin

4.2.1 Kokonaistyyppi

Biohiilellä ei havaittu vaikutusta kompostimassan kokonaistyyppihäviöön kokeiden aikana. Aiemmissa tutkimuksissa biohiilen lisääminen kompostimassaan ei ole vaikuttanut (Sánchez-Garcia ym. 2015) tai on jopa vähentänyt (Steiner ym. 2010; López-Cano ym. 2016) kokonaistyyppihäviötä kompostoinnin aikana, vaikka kompostimassan orgaanisen aineksen hajoaminen on ollut nopeampaa. Sánchez-Garcia ym. (2015) puhuvat biohiilen aiheuttamasta kompensatiovaikutuksesta, joka aiheuttaisi sen, että kokonaistyyppihäviö ei kasva biohiilikomposteissa, vaikka orgaanisen aineksen hajoaminen on nopeampaa. Tämä kompensatiovaikutus on kuitenkin riippuvainen lisättävästä biohiilen määrästä (Sánchez-Garcia ym. 2015). Kompostoinnin alkuvaiheessa tehdyissä mittauksissa kokonaistyyppihäviön muutoksia ei välttämättä havaita, koska esimerkiksi biohiilikomposteissa havaittu nopeampi orgaanisen aineksen hajoaminen kokeen alussa vaikuttaa erilaisten typpiyhdisteiden haihtumiseen ja siten kokonaistyyppihäviöön. Sánchez-Garcia ym. (2015) arvioivat, että biohiilen lisääminen kompostimassaan voisi nopeuttaa kompostoitumista neljällä viikolla. Tämän seurauksena kompostoinnin alkuvaiheessa laskettujen kokonaistyyppihäviöiden avulla ei pystytä arvioimaan biohiilen vaikutuksia valmiin kompostin kokonaistyyppimääriin. Kokonaistyyppihäviöitä tulisikin tarkastella lähempänä kompostoinnin loppuvaihetta tai kompostoinnin alkuvaiheessa sen laskemisessa tulisi tarkemmin huomioida kompostin nopeamman stabiloitumisen vaikutus.

4.2.2 Ammoniakki

Tulosten perusteella biohiilen lisäyksellä ei ollut vaikutusta haihtuneen ammoniakkin määrään kompostointiprosessin alkuvaiheessa (Kuvat 9a - 9e ja Kuvat 14a - 14c). Tulokset tukevat esimerkiksi Sánchez-Garcian ym. (2015)

tutkimuksen tuloksia. Joissain aiemmissa tutkimuksissa biohiilen lisäys on vähentänyt haihtuneen ammoniakin määrää, mutta niissä kompostoitava materiaali on ollut erilaista tai biohiilipitoisuudet ovat olleet suurempia (Steiner ym. 2010; Malińska ym. 2014). Yhtenä syynä saatuihin tuloksiin voi olla se, että laitosmittakaavan kompostointikokeen koejärjestely poikkesi aikaisemmista tutkimuksista. Suurimpana erona oli se, että Ämmäsuolla kompostilaitoksen tunnelien poistoilman ohjearvoksi automaatiojärjestelmään oli asetettu tunnelikompostoinnin ensimmäisen vaiheen ajaksi 40 °C. Poistoilman lämpötilan noustessa yli ohjearvon pyrkii automaatiojärjestelmä jäähdyttämään tunnelia lisäämällä raitisilmakiertoa. Tavallisesti kompostimassan lämpötila nousee kompostionnin alkuvaiheessa 50 - 70 °C:een ja aiemmissa tutkimuksissa lämpötilaa ei ole pyritty säätämään samalla tavalla (Steiner ym. 2010; Malińska ym. 2014; Sánchez-Garcian ym. 2015).

Osaltaan alhaisemmalla lämpötilalla pystytään vähentämään kompostoinnissa syntyviä ammoniakkipäästöjä. Esimerkiksi Pagans ym. (2006) tutkivat kompostin lämpötilan vaikutusta haihtuneen ammoniakin määrään. Heidän tutkimuksen tulosten perusteella kompostoinnin termofiilivaiheen alussa kompostin lämpötilan noustessa haihtuneen ammoniakin määrä kasvaa eksponentiaalisesti (Pagans ym. 2006). Laitoskokeiden tuloksista huomataan, miten BH5-tunnelin poistoilman lämpötila oli neljän ensimmäisen päivän ajan selvästi ohjearvon yläpuolella (Kuva 14a - 14c). Esimerkiksi Malińska ym. (2014) ja Czekala ym. (2016) ovat raportoineet biohiilen lisäyksen vaikutuksista kompostimassan korkeampiin lämpötiloihin. BH5-tunnelin kiertoilman korkeampaa lämpötilaa voidaan pitää yhtenä syynä korkeisiin ammoniakkipitoisuuksiin kokeen alussa.

Biohiilen lisäys kompostimassaan vaikutti selkeästi korkeimpien haihtuneen ammoniakin määrien havaintoajankohtiin. Molempien kokeiden ammoniakkikuvaajista huomataan, miten biohiilen lisääminen aikaistaa korkeimpia mitattuja ammoniakkipitoisuuksia (Kuvat 9a - 9e ja Kuvat 14a - 14c).

Biohiilikompostien korkeammat ja aikaisemmat ammoniakkipiikit poikkeavat aikaisemmasta kirjallisuudesta (Steiner ym. 2010; Malińska ym. 2014).

Selkeää syytä ammoniakkipiikin aikaistumiselle ei löydetty, mutta orgaanisen aineksen hajoamisen ja aiemman kirjallisuuden perusteella voidaan arvioida (Itävaara ym. 2006; Pagans ym. 2006), että biohiilen lisääminen kompostimassaan saattoi nopeuttaa helposti hajoavan orgaanisen aineksen, esimerkiksi proteiinien hajoamista, ja sitä kautta myös nopeuttaa kompostimassan lämpötilan nousua niin paljon, että ammoniakkipiikki havaittiin aikaisemmin kuin kontrollikomposteilla. Pagans ym. (2006) arvioivat, että kompostoinnin alkuvaiheen lämpötilan noususta seuraava eksponentiaalinen kasvu ammoniakin haihtumisessa johtuisi mikrobien eksponentiaalisesta kasvusta ja niiden metaboliassa syntyvän lämmön vaikutuksesta. Czekala ym. (2016) pohtivat artikkelissaan, että syynä biohiilikompostien korkeampaan lämpötilaan olisi mikrobiaktiivisuuden lisääntyminen. Teoriaa ammoniakin haihtumisesta ja edelleen biohiilen vaikutusta mikrobien aktiivisuuden kasvuun tukevat biohiilen vaikutus orgaanisen aineksen hajoamiseen kompostoinnin alkuvaiheessa, BH-tunneleiden tunneliläppien korkeammat oloarvot sekä BH-kompostien aikaisemmat ammoniakkipiikit. Toisaalta tunneliläppien korkeammat oloarvot ja siten lisääntynyt hapen määrä kompostointitunneleissa saattoivat kiihdyttää orgaanisen aineksen hajoamista, joka edelleen nostaisi kompostimassan lämpötilaa ja siten vaikuttaisi uudelleen tunneliläppien oloarvoihin sekä ammoniakin haihtumiseen.

Tunnelikompostointivaiheessa typpipäästöjä pystytään tarkkailemaan ja poistoilma pystytään puhdistamaan biopesurin avulla. Kompostien kypsyminen ja orgaanisen aineksen hajoaminen kuitenkin jatkuu ulkoaumoissa, missä päästöjä ei enää pystytä seuraamaan. Vaikka biohiilen lisäyksellä ei havaittu vaikutusta ammoniakin haihtumiseen tunnelikompostoinnin ensimmäisen vaiheen aikana, niin voiko kompostin seulonnasta aiheutuva biohiilen konsentroituminen vaikuttaa ammoniakin haihtumiseen ulkoaumassa? Tämän tutkimuksen ja aiemman kirjallisuuden perusteella alle kuuden prosentin biohiilen lisäyksellä

pystytään vaikuttamaan orgaanisen aineksen hajoamiseen ja siten kompostin stabiloitumiseen (Malińska ym. 2014; Sánchez-Garcia ym. 2015), mutta yleisesti suuremmat biohiilipitoisuudet ovat vähentäneet myös haihtuneen ammoniakkin määrää (Malińska ym. 2014). Teoriassa on mahdollista, että biohiilen konsentroitumisen seurauksena ammoniakkin haihtuminen vähenisi ulkoauomoissa. Tätä teoriaa tukee aiemman kirjallisuuden lisäksi kompostimassan ammoniumtypen määrä kokeen lopputilanteessa (Steiner ym. 2010; Malińska ym. 2014).

4.2.3 Ammoniumtyppi

Laitosmittakaavan kokeen ulkoauaman viimeisessä seurannassa biohiilikompostien ammoniumtypen pitoisuudet olivat merkitsevästi suurempia kuin kontrollikompostissa (Kuva 17). Samanlaisia tuloksia on saanut esimerkiksi Vandeesteele ym. (2016). Yhtenä selityksenä tälle voidaan pitää sitä, että biohiilikompostissa biohiili olisi lisännyt ammoniumtypen pidättymistä kompostimassassa, kun taas kontrollikompostissa ammoniumtyppeä olisi valunut joko suotoveden mukana tai sitä olisi haihtunut ammoniakkina. Kokonaistyyppihäviöitä eikä nitraatti-/ammoniumtypen suhdetta voida tässä tapauksessa käyttää hyödyksi, koska kontrollikompostin orgaanisen aineksen määrässä tai näytteenotossa oli epäselvyyksiä ulosannon yhteydessä tehdyssä mittauksessa ja nitraattitypen määrää ei tutkittu. Tietysti on olemassa mahdollisuus, että biohiili olisi negatiivisesti vaikuttanut ammoniumtypen nitrifikaatioon ja siten ammoniumtypen määrä olisi pienempi ilman biohiiltä. Kirjallisuus ja biohiilikompostien nopeampi stabiloituminen eivät kuitenkaan tue tätä teoriaa (Vandeesteele ym. 2016). López-Cano ym. (2016) havaitsivat, että biohiilen sekoittaminen kompostimassaan lisäsi nitraattitypen määrää valmiissa kompostissa. Tulosten ja kirjallisuuden perusteella yhtenä teoriana voidaan pitää sitä, että seulonnasta aiheutunut biohiilen konsentroituminen vaikuttaisi tyyppiyhdisteiden pidättymiseen kompostin stabiloitumisvaiheessa (Malińska ym. 2014; Vandeesteele ym. 2016).

4.3 Epävarmuustekijät

Kompostointitutkimuksissa yksi suurimmista kaikkiin mittauksiin ja määrittäisiin vaikuttavista epävarmuustekijöistä on kompostimassan heterogeenisyys. Erityisesti biojätteen kompostoinnissa heterogeenisyyden merkitys lisääntyy. Laitosmittakaavan kompostoinnissa biojätteen koostumus vaihtelee huomattavasti, koska esimerkiksi Ämmäsuolle saapuvat biojätteet on luokiteltu kahteen eri luokkaan (biojäte ja teollisuusbiojäte) ja niiden laatu ja siten kemialliset ominaisuudet voivat vaihdella huomattavasti (Toukola ym. 2011). Kompostoitavan materiaalin eroavaisuudet kemiallisissa ominaisuuksissa aiheuttavat muutoksia edelleen esimerkiksi orgaanisen aineksen määrään sekä mikrobilajistoon ja siten koko kompostointiprosessiin. Kompostimassan heterogeenisyyden takia myös edustavien näytteiden saaminen komposteista on haastavaa. Ämmäsuolla tunnelikompostien panoskoot ovat noin 280 tonnia. Tehtäessä laboratorioanalyysijä tunneleiden kompostimassasta otetuista kokoomanäytteistä, puhutaan grammoista. Tämän takia edustavien näytteiden saaminen on erityisen tärkeää. Toisaalta mädätetyn biojätteen kemiallisia ominaisuuksia voidaan pitää huomattavasti homogeenisempinä kuin raakabiojätteen.

Laitosmittakaava loi tutkimukseen omat haasteensa ja nämä voivat osaltaan luoda epävarmuustekijän tulosten luotettavuuteen. Tunnelikompostointivaiheessa panoksia ei pystytty tarkastelemaan tunneleissa yhtä pitkiä aikoja, koska laitoksen tuli pysyä täydessä toiminnassa kokeista huolimatta ja tämän seurauksena tunnelien tyhjentämiset täytyi aloittaa kompostointilaitoksen aikataulujen mukaisesti. Vähäisen toistomäärän takia ulkoaumoista tehtyjä määrittäksiä ja niiden tuloksia ei voida pitää täysin luotettavina, vaan ne ovat enemmän suuntaa antavia. Marras- ja joulukuussa tehdyn seurannan kylmillä ja sateisilla sääolosuhteilla oli todennäköisesti merkittävä vaikutus kompostien stabiloitumiseen. Aumojen pinnan ja sisäosien väliset stabiloitumisnopeudet saattavat erota merkittävästi ja tämän seurauksena suhteellisen vähäiset näyte- ja

toistomäärät heikensivät tulosten luotettavuutta. Ulkoaumojen seurannasta saatuja tuloksia ei myöskään pystytty vertaamaan samalla tavalla kuin kompostoinnin alkuvaiheen tuloksia laitospittakaavassa pystyttiin vertaamaan laboratoriokokeiden tuloksiin. Laboratoriokokeen kesto oli kaksi viikkoa, kun taas ulkoaumojen viimeinen seuranta tapahtui noin 1,5 kuukautta kokeen aloituksen jälkeen. Lisäksi biohiilen konsentroituminen kompostimassan seulonnan yhteydessä aiheutti oman haasteensa ulkoaumojen seurantaan ja tulosten johtopäätöksiin, koska seulonnan jälkeen todellista biohiilen määrää kompostimassassa ei enää tiedetty. Biohiilen konsentroituminen seulonnan yhteydessä sekä sen vaikutukset kompostin stabiloitumiseen kannattaa huomioida tarkemmin tulevaisuudessa.

Laboratoriomittakaavan kokeissa saadut orgaanisen aineksen prosenttiosuudet sekä orgaanisen aineksen häviön prosenttiosuudet saattoivat olla todellista suurempia. Tämä voi johtua siitä, että näytteitä ei hienonnettu ennen niiden hehkuttamista muhveliuunissa. Lisäksi näytteiden 3,5 tunnin poltto aika uunissa oli melko lyhyt raekokoon nähden. Tämän seurauksena esimerkiksi suurempien puukappaleiden palaminen ei välttämättä ollut täydellistä ja se mahdollisesti antoi lopuksi punnitulle tuhkalle todellista suuremman massan. Se saattoi edelleen vaikuttaa laskettuun orgaanisen aineksen osuuteen. Toisaalta kaikki määritykset tehtiin samalla menetelmällä, joten tällä ei pystytty selittämään käsittelyiden välisiä eroja.

4.4 Biohiilen käyttö osaksi orgaanisten jätteiden käsittelyä

Tämän tutkimuksen tulosten sekä aiemman kirjallisuuden perusteella voidaan todeta, että biohiilen lisäämisellä on melko selkeästi positiivisia vaikutuksia erilaisten jätteiden kompostoinnissa niin laboratorio- kuin laitospittakaavassa (Malińska ym. 2014; Vandecasteele ym. 2016). Tämän takia on tärkeä pohtia menetelmän laajempaa käyttöönottoa sekä sen tuomia mahdollisuuksia ja

ongelmia. Biohiilen lisäämistä kompostimassaan laitosmittakaavan kompostoinnissa ei voida tarkastella pelkästään itse kompostointiprosessin kannalta, vaan prosessia ja sen ympäristövaikutuksia tulee kriittisesti tarkastella aina biohiilen valmistuksesta kompostimullan käyttökohteeseen asti. Abivenin ym. (2014) mukaan ympäristön parempaa tilaa ajateltaessa, biomassan pyrolysoinnista ja biohiilen käytöstä voidaan hyötyä vain, jos orgaanisen jätteen käsittely, biopolttoaineiden ja uusiutuvan energian tuotanto sekä biohiilen maanparannusainekäyttö huomioidaan samanaikaisesti.

Biohiilen laajempaa käyttöä tarkasteltaessa on tärkeä pohtia laaja-alaisemmin sen ympäristövaikutuksia. Esimerkiksi missä ja miten pyrolysointi tapahtuisi, millaisesta biomassasta biohiiltä olisi myös ekologisesti järkevä tuottaa? Mitkä ovat kompostimullan yleisimmät käyttökohteet sekä millainen vaikutus biohiilellä on käyttökohteiden maaperässä? Vaikka biohiilikompostien etuna maanparannusaineena voidaan pitää sitä, että niissä yhdistyvät puhtaan biohiilen ja kompostimassan positiiviset vaikutukset maaperään (Zhang ym. 2014), on vaikutuksista saatavilla tutkimustietoa vain verrattain lyhyeltä aikaväliltä (Abiven ym. 2014). Niemi (2015) nostaa Uusiouutisten artikkelissaan esiin, miten biohiilen hyviä vaikutuksia satomääriin ja viljelymaiden ominaisuuksiin markkinoitaessa tulee muistaa, että ainakin vielä tällä hetkellä huomattava osa tutkimuksista on tehty trooppisissa tai subtrooppisissa oloissa. Vaikka Etelä-Suomessakin tehdyssä tutkimuksessa biohiilen lisääminen viljelypeltoon paransi maaperän vedenpidätyskykyä (Karhu ym. 2011), voidaan olettaa, että kuivemmassa ilmastossa parantuneella vedenpidätyskyvyllä on suuremmat vaikutukset peltojen satomääriin. Lisäksi osa Suomen pelloista kärsii ajoittain liiallisistakin sateista ja niille pelloille parantunut vedenpidätyskyky ei välttämättä ole toivottua. Kattavan kokonaiskuvan saaminen edellyttää lisätutkimusta.

Tulevaisuudessa oman mahdollisuutensa biohiilitutkimukseen sekä prosessien käyttöönottoon luo uusi Euroopan komission kiertotalouspaketti (Euroopan komissio 2015). Euroopan komissio julkaisi tiedonannon uudesta

kiertotalouspaketista joulukuussa 2015. Kiertotalouspaketin tarkoituksena on auttaa Euroopan taloutta ja kuluttajia siirtymään kiertotalousmalliin, jossa resursseja käytetään yhä kestävämmällä tavalla. Tavoitteet tulevat vaikuttamaan jäsenmaiden jätelainsäädäntöön, joka edelleen vaikuttaa jätteenkäsittelyn paikallisiin ja alueellisiin säädöksiin. Kiertotalouspaketin sisältö on mahdollisuus erityisesti jätealan toimijoille ja tutkimukselle, koska kiertotalous tulee saamaan EU-rahoitusta yhteensä yli 6 miljardia euroa. Kiertotalouspaketin sisältö tulee vaikuttamaan laaja-alaisesti jätealan toimijoihin niin lainsäädännön kuin mahdollisten investointi- ja tutkimusrahoitusten kautta. (Euroopan komissio 2015.)

4.4.1 Pyrolyysi suoran energiahyödyntämisen rinnalle

Biohiilen laajemman käytön yhtenä ongelmana kompostoinnissa on sen hinta, koska se loisi lisäkustannuksen kompostointilaitokselle. Laitosmittakaavan kompostoinnissa tarvittavat biohiilihiilimäärät olisivat tuhansia tonneja vuodessa. Voisiko biohiilen lisääminen kompostimassaan olla taloudellisesti ja ekologisesti järkevää laitosmittakaavan kompostoinnissa? Metsäbiomassasta valmistettavan biohiilen käyttö biojätteen kompostoinnissa ei tunnu järkevältä ja ekologisesti kestävältä vaihtoehdolta, vaikka sen avulla pystyttäisiinkin parantamaan kompostointiprosessia ja siten vähentämään kompostoinnin ympäristövaikutuksia. Biohiilen yhtenä etuna on se, että sitä voidaan valmistaa hyvin erilaisista biomassoista (Lehmann 2007a). Yhtenä vaihtoehtona biohiilen biomassaksi voisivat olla erilaiset orgaaniset jätteet ja sitä kautta biohiiltä voisi tulevaisuudessa olla mahdollista valmistaa ekologisesti kestäväällä tavalla ja sellaisia määriä, että sen käyttö voisi olla myös taloudellisesti järkevää laitosmittakaavan kompostoinnissa.

Jäteasetus (179/2012) ja Euroopan komission joulukuussa 2015 julkaisema tiedonanto uudesta kiertotalouspaketista (Euroopan komissio 2015) ohjaavat kohti

vähemmän ympäristöä kuormittavia jätteenkäsittelymenetelmiä ja kiertotalousajattelua. Lopéz-Cano ym. (2016) pohtivat artikkelissaan, että maatiloilla biohiilen käyttö kompostoinnissa voisi parantaa alueellisesti resurssien kestäväää käyttöä. Biohiilen tuottaminen ja käyttö yhdistettäisiin alueen jätteiden käsittelyyn siten, että biohiili tuotettaisiin maatilan omista orgaanisista jätteistä (Lopéz-Cano ym. 2016). Voisiko tähän Lopéz-Cano ym. (2016) ajatusmalliin maatilan paikalle sijoittaa jätteenkäsittelykeskuksen? Jätteenkäsittelykeskuksissa kompostoinnissa käytettävä biohiili tuotettaisiin samalla tavalla alueella olevista orgaanisista jätteistä ja samalla pyrittäisiin resurssien kestävään käyttöön sekä yhä paikallisempaan kierrätykseen. Voisiko tulevaisuudessa erilaisten jätteiden käyttö pyrolyysin biomassana olla viimeinen askel tuotannon kannattavuuteen ja sitä kautta biohiilen laajempaan käyttöön esimerkiksi kompostointilaitoksissa? Näin ainakin osalle kierrätyskelpoisesta jätteestä pystyttäisiin tuottamaan lisäarvoa suoran energiahyödyntämisen sijaan sekä samalla mahdollisesti lisätä jätteiden kierrätysosuutta. Esimerkiksi, jos puujätteestä valmistettaisiin pyrolyysin avulla biohiiltä, joka täyttäisi lannoitelainsäädännön vaatimukset ja sitä käytettäisiin maanparannusaineena, voitaisiin ympäristöneuvos R. Levisen (henkilökohtainen sähköpostiviesti, 27.1.2016) alustavan pohdinnan mukaan puujätteen katsoa tulleen kierrätetyksi. Forssan seudulla on ollut jo paikallisen ekoteollisuuspuiston kehittämishanke, jossa muun muassa pyrolysoitiin tutkimus- ja demonstraatiokäyttöön tehdyllä hidaspYROLYYSIRETORTILLA yhdyskunnista peräisin olevia sivuvirtoja sekä muita biohajoavia materiaaleja (Tiilikkala ym. 2013).

Vuonna 2012 voimaan tulleen jäteasetuksen (179/2012) tavoitteena on, että vuonna 2016 yhdyskuntajätteestä kierrätetään 50 % sekä rakennus- ja purkujätteestä 70 % vuonna 2020. Vuonna 2012 yhdyskuntajätteestä kierrätettiin vain noin kolmannes (SVT 2015). Suomessa esimerkiksi puupohjaisen rakennusjätteen hyödyntäminen on pääasiassa energiahyödyntämistä. Rakennusjätteiden kierrätystavoitteen saavuttamisen yhtenä suurena ongelmana onkin, että puupohjaiset materiaalit muodostavat suurimman osan talonrakennusjätteistä (Kojo ja Lilja 2011) ja niiden polttaminen energiakäyttöön ei lisää kierrätysosuutta. Jäteasetuksen tavoitteet ovat Euroopan Unionin

jäsenvaltioita sitovia, joten joitain muutoksia jätteiden kierrätyksen lisäämiseksi tullaan lähivuosina tarvitsemaan. Lisäksi 1. tammikuuta 2020 Valtioneuvoston asetuksen (331/2013) rajoitukset orgaanisen jätteen sijoittamisesta kaatopaikalle ja maanrakennuskäyttöön alkavat koskea täysimääräisesti myös rakennus- ja purkujätteitä. Teoriassa voisi olla mahdollista, että tulevaisuudessa osa jätetuusta tai muusta orgaanisesta jätteestä hyödynnettäisiin pyrolyysissä suoran energiahyödyntämisen rinnalla siten, että lopputuotteena saatavaa biohiiltä voitaisiin käyttää esimerkiksi kompostointilaitoksissa ja samalla otettaisiin pieni askel kohti jäteasetuksen uusia kansallisia kierrätystavoitteita.

Yhtenä esteenä biohiilen käytön yleistymiselle on esitetty myös päästökauppaa ja hiilidioksidin päästöoikeuksien halpaa hintaa (Lehmann 2007a). Biohiilen markkinat maanparannusaineena saattaisivat muuttua merkittävästi, jos hiilinielut saataisiin osaksi päästökauppajärjestelmää. Tämän seurauksena taas jätteiden käyttö pyrolyysin biomassana saattaisi saada huomattavasti edullisemman aseman. Päästökaupassa maaperään sidottu hiili toimisi hiilinieluna siten, että siitä maksettaisiin korvaus. (Niemi 2015). Mielestäni tämä kuulostaa lyhyellä aikavälillä epätodennäköiseltä ja vaikeasti toteutettavalta ajatukselta. Jos ohjauskeinoa tarvitaan, niin yksinkertaisempi lähestymistapa voisi olla kansallinen ohjauskeino, joka olisi todennäköisesti huomattavasti helpompi toteuttaa. Esimerkiksi jäteasetuksen (179/2012) yhä tiukempiin kierrätystavoitteisiin pyrkiminen voisi mahdollistaa sen, että ohjauskeinona pystyttäisiin käyttämään taloudellista tai verotuksellista kannustinta.

4.4.2 Tulevaisuus Ämmässuolla

Vuonna 2015 Ämmässuolla aloitettiin mädätetyn puhdistamolietteen tunnelikompostointi. Vuonna 2020 Espoon Blominmäkeen valmistuu uusi jätevedenpuhdistamo, jonka jätevesilietteet on tarkoitus käsitellä Ämmässuolla. Tämä tulee kasvattamaan kompostointikelpoisen jätteen määrää ja siten lisäämään

prosessien kehittämistarvetta. Malińskan ym. (2014) tutkimuksen mukaan biohiilen lisääminen jätevesilietteen ja puuhakkeen sekoitukseen vähensi sen kompostoinnissa syntyviä ammoniakkipäästöjä sekä kiihdytti kompostointiprosessia. Niin ikään Zhang ym. (2014) havaitsivat tutkimuksessaan biohiilen positiivisen vaikutuksen jätevesilietteen orgaanisen aineksen hajoamiseen kompostoinnissa. Myös tämän tutkimuksen tulosten perusteella biohiilen käyttöä jätevesilietteen tunnelikompostoinnissa kannattaa lähitulevaisuudessa tarkastella ja tutkia tarkemmin. Toisaalta Luonnonvarakeskuksessa on tutkittu jätevesilietteen käyttäytymistä pyrolyysiprosessissa (Rasa ym. 2015). Tutkimuksen perusteella pyrolysointi voi tulevaisuudessa olla yksi vaihtoehto jätevesilietteen hyödyntämisessä, mutta se vaatii vielä paljon tutkimustietoa lopputuotteiden turvallisuudesta, puhtaudesta ja helppokäyttöisyydestä sekä raaka-ainekohtaista prosessin optimointia (Rasa ym. 2015). Nykylainsäädännön mukaan puhdistamolietteestä valmistettua biohiiltä ei kuitenkaan voitaisi käyttää maanparannusaineena, koska se ei voi täyttää elintarviketurvallisuusviraston (Evira) tyyppinimiluettelossa olevan kasviperäisen kasvualustahiilen vaatimuksia (T. Suoniitty, henkilökohtainen sähköpostiviesti, 22.1.2016). Ympäristöneuvos R. Levisen (henkilökohtainen sähköpostiviesti 27.1.2016) alustavan näkemyksen mukaan: ”Ainakin teoriassa on mahdollista tehdä tyyppinimiluetteloon tätä koskeva lisäys. Eri asia, onko tällaiseen edellytyksiä”.

Kompostoinnin ja mädätyksen yhdistävässä osavirtamädätysprosessissa mädätteen ominaisuudet sekä mädätysprosessin tehokkuus ovat merkittävässä roolissa. Mummen ym. (2014) tutkimuksessa biohiilellä todettiin olevan positiivisia vaikutuksia mädätysprosessiin. Tutkimuksen mukaan biohiilen lisäämisellä mädätysprosessiin pystyttiin vähentämään lievää ammoniakki-inhibitiota sekä parantamaan metaania tuottavien mikrobien kasvua (Mumme ym. 2014). Mädätysprosessissa korkeaa ammoniakkipitoisuutta voidaan pitää yhtenä tärkeimpänä metaania tuottavien mikrobien kasvua rajoittavana tekijänä (Rajagopal ym. 2013). Tämä edelleen vaikeuttaa mädätysprosessin optimointia (Mumme ym. 2014). Mädätysprosessiin liitettynä biohiili on vielä melko uusi

tutkimuskohde, mutta toisaalta osavirtamädätysprosessia optimoitaessa ja biohiilen käyttöä tarkasteltaessa hyvinkin ajankohtainen. Voisiko esimerkiksi osavirtamädätysprosessissa biohiiltä sekoittaa biojätteeseen jo mädätysvaiheessa? Ämmäsuolla jatkohankkeissa on suunnitteilla tutkimuksia biohiilen käytöstä mädätysprosessissa sekä erilaisten biomassojen käytöstä pyrolysoinnissa.

4.4.3 Lainsäädäntö ja tutkimustiedon vaillinaisuus

Suomessa Eviran maan rakennetta parantavien aineiden listalta löytyy tällä hetkellä yksi biohiilituote: kasvipерäinen kasvualustahiili. Jäteperäisiä hiiliä ei listalta löydy (Niemi 2015). Tämän seurauksena esimerkiksi sellaisista orgaanisista materiaaleista valmistetut biohiilet, jotka eivät täytä kasvipерäisen kasvualustahiilen vaatimuksia, olisivat ainakin vielä nyky-lainsäädännön mukaan palamistapahtuman jätettä, vaikka kemiallisten ominaisuuksien kannalta vaatimukset täytyisivätkin. Euroopan tasolla pyrolysointiteknikat kehittyvät jatkuvasti ja monia biohiileen ja pyrolysointiin liittyviä laatustandardeja sekä EU:n lannoitevalmistelainsäädännön uudistus on valmisteilla. Uudessa lannoitelainsäädännössä biohiilet tullaan todennäköisesti jo huomioimaan. (Tiilikkala ym. 2013; Niemi ym. 2015.)

Biohiilitutkimukset eivät ole juurikaan keskittyneet jäteperäisiin biohiiliin (Niemi 2015), vaikkakin muutosta siihen suuntaan on havaittavissa. Niemi (2015) pohtii artikkelissaan erilaisten jätekoostumusten pyrolyysituotteiden ominaisuuksien eroja ja miten tärkeää niiden selvittäminen on ennen käytännön investointeja. Lisäksi eri tavalla ja erilaisista biomassoista valmistettujen biohiilien ominaisuudet saattavat herkästi vaihdella. Lähitulevaisuudessa Euroopan komission kiertotalouspaketin innovaatio- ja tutkimusrahoituksen kautta jäteperäisten biohiilien tutkimukseen on mahdollisuus saada lisäpuhtia.

Puuperäisen biohiilen laadun vaihtelu ei aiheuta kielteisiä vaikutuksia maaperän hajottajaeliöstöön, joten sitä voidaan pitää myös ympäristöystävällisenä tuotteena (Fagernäs ym. 2014). Tämä voi olla ongelma jätetuusta tai muista orgaanisista jätteistä valmistetuissa biohiilissä, koska pyrolyysiprosessin maksimilämpötilan noustessa haihtumattomat raskasmetallit konsentroituvat lopputuotteeseen (Rasa ym. 2015). Tutkimustiedon ja raaka-ainekohtaisen prosessin optimoinnin avulla pyrolyysiteknologiasta voidaan tulevaisuudessa saada yksi vaihtoehto erilaisten orgaanisten materiaalien hyödyntämisen lisäämiseksi (Rasa ym. 2015). Tämä on mahdollista vain, jos tavoitteena on valmistaa korkealaatuinen lisäarvotuote siten, että samanaikaisesti huomioidaan orgaanisen jätteen käsittely, uusiutuvan energian tuotanto sekä biohiilen maanparannusainekäyttö (Abiven ym. 2014; Rasa ym. 2015). Tarkasteltaessa ekologisesti kestävä ja kompostointiprosessia parantavaa tukiainevaihtoehtoa, kiertotalouspaketin tavoitteita sekä vuonna 2020 voimaan astuvia kierrätystavoitteita, voidaan jätteperäisten biohiilien käyttöä maanparannusaineena pitää laajempainakin ajatusmallina ja tärkeänä tutkimuskohteena.

5 Johtopäätökset

Tutkimuksen tulosten perusteella voidaan todeta, että alle viiden prosentin biohiilen lisäyksellä havaittiin myönteinen vaikutus kompostointiprosessiin laitosmittakaavan osavirtamädätysprosessissa. Kokonaisuutena biohiilen lisäys paransi kompostimassan mikrobiaktiivisuutta ja siten nopeutti orgaanisen aineksen hajoamista sekä nopeutti kompostin stabiloitumista. Laboratorio- ja laitoskokeiden tulosten perusteella alle kuuden prosentin biohiilen lisäyksillä ei ollut vaikutusta haihtuneen ammoniakkin määrään eikä kokonaistyyppihäviöön kompostoinnin alkuvaiheessa.

Laitosmittakaavan osavirtamädätysprosessin kompostointivaiheessa suurin potentiaali kompostimassaan lisättävillä pienillä, alle viiden prosentin biohiilen

lisäyksillä, on vaikuttaa kompostien stabiloitumisnopeuteen ja sitä kautta vähentää kompostoinnin ympäristövaikutuksia, vähentää kompostien kypsyttämiseen tarvittavaa tilaa tai vastaavasti kasvattaa kompostointilaitoksen kapasiteettia. Tutkimuksen ja pyrolyysilaitteistojen kehittämisen avulla jäteperäisistä biohiilistä voidaan tulevaisuudessa saada yksi tukiainevaihtoehto laitosmittakaavan kompostointiin. Kompostoinnin ympäristökuormituksen vähentämisen lisäksi jäteperäisten biohiilten käytöllä voi tulevaisuudessa olla mahdollisuus lisätä paikallisesti jätteiden kierrätysmääriä.

Tämän tutkimuksen tuloksia ajatellen, tärkeitä tutkimuskohteita erityisesti laitosmittakaavan kompostoinnin kannalta, ovat biohiilen seulonnasta seuraava biohiilen konsentroituminen ja sen vaikutukset kompostin stabiloitumiseen ulkoaumoissa sekä laajemmin jäteperäisten biohiilten käyttö kompostointiprosessissa sekä niiden vaikutukset maaperän prosesseihin.

6 Kiitokset

Aluksi haluan kiittää ympäristöministeriötä ja HSY:tä tästä hienosta mahdollisuudesta tehdä Pro gradu -tutkielma näin mielenkiintoisesta ja ajankohtaisesta aiheesta. HSY:n työntekijöistä haluan erityisesti kiittää ohjaajaani Aino Kainulaista kaikesta saamastani avusta graduprojektini aikana sekä Christoph Gareisia ja Kimmo Koivusta asiantuntevista kommentteista. Kiitos kaikille HSY:n kompostointilaitoksen työntekijöille sekä Kaiwur Oy:n pyöräkuormaajien kuljettajille kaikesta avusta laitoskokeiden aikana.

Yliopiston puolelta haluan kiittää Kari Steffeniä laboratoriokokeiden järjestelyistä sekä Aki Sinkkosta tilastanalyysien ohjauksesta ja tärkeästä kannustuksesta. Suurimmat kiitokset tutkielman vastuulliselle ohjaajalle Martin Romantschukille.

Lopuksi haluan kiittää vanhempiani ja sisaruksiani kaikesta saamastani tuesta. Kiitos myös ystävilleni ja erikoismaininta Lauri Pekolalle, kun jaksoit tukea ”akateemisen unelman” tavoitteluani heikoillakin hetkillä

7 Kirjallisuus

- Abiven S., Schmidt M., Lehmann J. 2014: Biochar by design – *Nature Geoscience* Vol. 7, s: 326 - 327.
- Clough T., Condon L. 2010: Biochar and the Nitrogen Cycle: Introduction – *Journal of Environmental Quality* Vol. 39, s: 1218 – 1223
- Czekala W., Malinska K., Caceres R., Janczak D., Dach J., Lewicki A. 2016: Co-composting of poultry manure mixtures amended with biochar – The effect of biochar on temperature and C-CO₂ emission – *Bioresource Technology* Vol 200. s: 921 - 927.
- de Guardia A., Mallard P., Teglia C., Marin A., Le Pape C., Launay M., Benoist J.C., Petiot C. 2010: Comparison of five organic wastes regarding their behavior during composting: Part 2, nitrogen dynamic – *Waste Management* Vol 30, s: 415 - 425.
- de Guardia A., Petiot C., Rogeau D., Druilhe C. 2008: Influence of aeration rate on nitrogen dynamics during composting - *Waste Management* Vol 28, s: 575 - 587.
- Dias B., Silva C., Higashikawa F., Roig A., Sanchez-Monedero M. 2010: Use of biochar as bulking agent for composting of poultry manure: Effect on organic matter degradation and humification – *Bioresource Technology* Vol 101, s: 1239 - 1246.
- Euroopan komission tiedonanto 2015: Closing the loop: Commission adopts ambitious new Circular Economy Package to boost competitiveness, create jobs and generate sustainable growth - *European Commission - Press release*, siteerattu 9.12.2015, saatavilla: http://europa.eu/rapid/press-release_IP-15-6203_en.htm
- Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2008/98/EY, annettu 19 päivänä marraskuuta 2008, jätteistä ja tiettyjen direktiivien kumoamisesta
- Fagernäs L., Kuoppala E., Ranta J., Arpiainen V., Tiilikkala K., Kemppainen R., Hagner M., Setälä H. 2014: Hidaspyrolyysituotteiden hyödyntäminen ja tuotannon kannattavuus, biohiili ja tisle – *VTT*, s: 52 - 59, 71.
- Fernández-Delgado Juárez M., Prähauser B., Walter A., Insam H., Franke-Whittle I. 2015: Co-composting of biowaste and wood ash, influence on a microbially driven-process – *Waste Management* Vol 46, s: 155 - 164.

- Franke-Whittle I.H., Confalonieri A., Insam H., Schlegelmilch M., Körner I. 2014: Changes in the microbial communities during co-composting of digestates - *Waste Management* Vol 32, s: 632 - 641.
- Fontell H. < hannahmaija.fontell@biolan.fi > 2015: Hiilen valmistus ja tilaaminen – henkilökohtainen sähköpostiviesti 19.8.2015
- Gustavsson J., Cederberg C., Sonesson U., van Otterdijk R., Meybeck A. 2011: Global food losses and food waste – Extent, causes and prevention. Rome, s: 4.
- HSY 2015: Biojätteen käsittely – siteerattu 19.11.2015, saatavilla: <https://www.hsy.fi/fi/asiantuntijalle/jatehuolto/jatteenkasittelykeskus/biojate/Sivut/default.aspx>
- Itävaara M., Vikman M., Kapanen A., Venelampi O., Vuorinen A. 2006: Kompostin kypsyystestit – menetelmäohjeet – VTT, s: 7 - 8.
- Jindo K., Sanchez-Monedero M., Hernandez T., Garcia C., Furukawa T., Matsumoto K., Sonoki T., Bastida F. 2012a: Biochar influences the microbial community structure during manure composting with agricultural wastes – *Science of the Total Environment* Vol. 416, s: 276 - 481.
- Jindo K., Suto K., Matsumoto K., Garcia C., Sonoki T., Sanchez-Monedero M. 2012b: Chemical and biochemical characterization of biochar-blended composts prepared from poultry manure – *Bioresource Technology* Vol. 110, s: 396 - 404.
- Kainulainen A., Mäkinen P. 2015: Biojätteen kompostoinnin ja mädätyksen innovatiiviset prosessiyhdistelmät – *KOMBI – Biohiilikokeen raportti*, s: 6 – 15.
- Karhu K., Mattila T., Bergström I., Regina K. 2011: Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity – Results from a short-term pilot field study – *Agriculture, Ecosystems and Environment* Vol. 140, s: 309 – 313.
- Kojo R., Lilja R 2011: Talonrakentamisen materiaalitehokkuuden edistäminen – *Ympäristöministeriön raportti* s: 59
- Kuba T., Tschöll A., Partl C., Meyer K., Insam H. 2008: Wood ash admixture to organic wastes improves compost and its performance – *Agriculture, Ecosystems and Environment* Vol 127, s: 43 - 49.
- Kurola J., Arnold M., Kontro M., Talves M., Romantschuk M. 2011: Wood ash for application in municipal biowaste composting – *Bioresource Technology* Vol 102, s: 5214 - 5220.
- Lehmann J. 2007a: A handful of carbon – *Nature* Vol. 447, s: 143 - 144.
- Lehmann J. 2007b: Bio-energy in the black – *Front Ecol Environ* Vol. 5, s: 381 - 387.

- Lehmann J., Rillig M., Thies J., Masiello C., Hockaday W., Crowley D. 2011: Biochar effects on soil biota – A review – *Soil Biology & Biochemistry* Vol 43, s: 1812 - 1836.
- Levinen R. < riitta.levinen@ymparisto.fi > 2016: Biohiili jätelainsäädännössä – henkilökohtainen sähköpostiviesti 27.1.2016.
- Lopéz-Cano I., Roig A., Cayuela M., Alburquerque J., Sánchez-Monedero M. 2016: Biochar improves N cycling during composting of olive mill wastes and sheep manure – *Waste Management*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.12.031>
- Malińska K., Zabochincka-Swiatek M., Dach J. 2014: Effets of biochar amendment on ammonia emission during composting of sewage sludge – *Ecological Engineering* Vol. 71 s: 474 - 478.
- Mumme J., Scrocke F., Hrrg., Werner M. 2014: Use of biochars in anaerobic digestion – *Bioresource Technology* Vol. 164, s: 189 - 197.
- Niemi T. 2015: Biohiilet viljelymaan korjaussarjoina – *Uusiouutiset* Vol. 3/2015, s: 16 - 17.
- Pagans E., Barrena R., Font X., Sanchez A. 2006: Ammonia emissions from the composting of different organic wastes. Dependency on process temperature – *Chemosphere* Vol. 62, s: 1534 – 1542.
- Paredes C., Bernal M. P., Roig A., Cegarra J., Sánchez-Monedero M.a. 1996: Influence of the bulking agent on the degradation of Olive-mill wastewater sludge during composting - *International Biodeterioration & Biodegradation*, s: 205 - 210.
- Pham T.P., Kaushik R., Parshetti G., Mahmood R., Balasubramanian R. 2015: Food waste-to-energy conversion technologies: Current status and future directions – *Waste Management* Vol. 38, s: 299 - 408.
- Pulkkinen S., Sinisalo S. 2012: Pääkaupunkiseudun kotitalouksien sekajätteen määrä ja laatu vuonna 2012 – *HSY:n julkaisu* 2/2013, s: 26.
- Rajagopal R., Masse D., Singh G. 2013: A critical review on inhibition of anaerobic digestion process excess ammonia – *Bioresource Technology* Vol. 143, s: 632 - 641.
- Rasa K., Ylivainio K., Rasi S., Eskola A., Uusitalo R., Tiilikkala K. 2015: Jätevesilietteen pyrolyysi – laboratorio- ja pilot-mittakaavan kokeita – *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 21/2015, s: 1 - 25.
- Sánchez-García M., Alburquerque J.A., Sanchez-Monedero m., Roig A., Cayuela M.L. 2015: Biochar accelerates organic matter degradation and enhances N mineralization during composting of poultry manure without a relevant impact on gas emissions – *Bioresource Technology* Vol. 192, s: 272 – 279.

- Sonoki T., Furukawa T., Jindo K., Suto K., Aoyama M., Sánchez-Monedero M. A. 2013: Influence of biochar addition of methane metabolism during thermophilic phase of composting – *Journal of Basic Microbiology* Vol 53, s: 617 - 621.
- Steiner C., Das K.C., Melear N., Lakly D. 2010: Reducing nitrogen loss during poultry litter composting using biochar – *Journal of Environmental Quality* Vol. 39, s: 1236 - 1242.
- Sundberg C., Franke-Whittle I., Kauppi S., Yu D., Romantschuk M., Insam H., Jönsson H. 2011: Characterisation of source-separated household waste intended for composting – *Bioresource Technology* Vol 102, s: 2859 - 2867.
- Sundberg C., Smårs S., Jönsson H. 2004: Low pH as an inhibiting factor in the transition from mesophilic to thermophilic phase in composting – *Bioresource Technology* Vol. 95, s: 145 - 150.
- Suomen virallinen tilasto (SVT 2015): Jätetilasto [verkkajulkaisu]. ISSN=1798-3339. 2012. Helsinki: Tilastokeskus, siteerattu: 9.12.2015, saatavilla: http://www.stat.fi/til/jate/2012/jate_2012_2013-11-26_tie_001_fi.html
- Suoniitty T. < lannoitevalvonta@evira.fi > 2016: Biohiili lannoitevalmistelainsäädännössä – henkilökohtainen sähköpostiviesti 22.1.2016.
- Tiilikkala K., Holstila T., Rasa K 2013: Testaus hitaan pyrolyysin soveltuvuudesta biomassojen prosessointiin uusiksi tuotteiksi ja energiaksi – *Loppuraportti MTT*, s: 1 - 21.
- Toukola V., Sinisalo S., Sormunen K., Pulkkinen S 2011: Pääkaupunkiseudun biojätteen koostumus – *HSY:n julkaisuja* 6/2011, s: 1 – 52.
- Valtioneuvoston asetus jätteistä: 19.4.2012/179
- Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista: 2.5.2013/331
- Vandecasteele B., Mondini C., D'hose T., Russo S., Sinicco T., Quero Alba A. 2011: Effect of biochar amendment during composting and compost storage on greenhouse gas emissions, N losses and P availability – siteerattu 9.12.2015, saatavilla: http://www.ramiran.net/doc13/Proceeding_2013/documents/S8.33..pdf
- Vandecasteele B., Sinicco T., D'hose T., Vanden Nest T., Mondini C. 2016: Biochar amendment before or after composting affects compost quality and N losses, but not P plant uptake – *Journal of Environmental Management* Vol 168, s: 200 - 209.
- Wahlström M., Laine-Ylijoki J., Jermakka J. 2012: Taustamuistio kaatopaikoista annetun valtioneuvoston päätöksen muuttamista varten – *Ympäristöministeriön raportti* s: 1 - 36.

- Wang C., Lu H., Dong D., Deng H., Strong P. J., Wang H., Wu W. 2013: Insight into the effects of biochar on manure composting: evidence supporting the relationship between N₂O emission and denitrifying community – *Environmental Science & Technology* Vol 46, s: 7341 - 7349.
- Wei L., Shutao W., Jin Z., Tong X. 2014: Biochar influences the microbial community structure during tomato stalk composting with chicken manure – *Bioresource Technology* Vol. 154, s: 148 - 154.
- Zhang J., Chen G., Sun H., Zhou S., Zou G. 2016: Straw biochar hastens organic matter degradation and produces nutrient rich compost – *Bioresource Technology* Vol 200, s: 876 - 883.
- Zhang J., Lü F., Shao L., He P. 2014: The use of biochar-amended composting to improve humification and degradation of sewage sludge – *Bioresource Technology* Vol 168, s: 252 - 258.